

# DIPLOMARBEIT

## Analyse und Beschreibung eines räumlichen Tragwerks aus Massivholzplatten

zum  
Erlangen des akademischen Grades

## DIPLOMINGENIEUR (Dipl.-Ing.)

Benjamin Hahn  
(Geboren am 04. Februar 1982 in Berlin)

Dresden, 28. August 2009



Betreuer: Prof. Dr-Ing. Peer Haller

**Fakultät für Bauingenieurwesen**  
**Institut für Holzbau und konstruktives Entwerfen**  
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller



Betreuer: Dipl.-Ing. Johannes Natterer

**Fakultät ENAC**  
**Institut für Holzkonstruktion IBOIS**  
Prof. Yves Weinand



# Aufgabenstellung Diplomarbeit

---

Name des Diplomanden	Benjamin Hahn
Studienrichtung	Konstruktiver Ingenieurbau

---

Thema:

## **Analyse und Beschreibung eines räumlichen Tragwerks aus Massivholzplatten**

Zielsetzung:

Ziel dieser Arbeit ist die numerische Modellierung eines Falterwerkes aus Massivholzplatten mit Hilfe der Finiten-Elementen-Methode. Die Arbeit umfasst die Erstellung des Modells im FE-Programm sowie die Bestimmung und Festlegung der Eigenschaften der Platten aus Holz, etc. Die Analyse der Ergebnisse bildet die Grundlage zur Bemessung und die Möglichkeit, Änderungen und Verbesserungen, zum Beispiel der Geometrie oder der Randbedingungen, vorzunehmen. Die Analyse soll dabei als Ausgangspunkt immer die Optimierung der Kosten, sowie das statische Verhalten und die architektonischen Betrachtungen haben.

### *a) Theoretische Betrachtungen:*

Der Entwurf einer bogenförmigen Tennishalle mit einer Spannweite von 45 m und mit einer Höhe von 11 m wird vorgeschlagen. An diesem Beispiel werden anschließend die Materialeigenschaften der Massivholzplatten festgelegt, und verschiedene Parameterstudien durchgeführt. Desweiteren zu betrachten gilt:

1. Vergleichsanalyse zwischen gelenkig und biegesteifen Verbindungen zwischen den Elementen
2. Größe der Finiten Elemente und Netzverdichtungen
3. Analyse und Optimierung der Anschlüsse

Diese Parameterstudien dienen zur Festlegung der maßgebenden Parameter, die zur Bemessung einer Origami Struktur erforderlich sind. Ziel ist ein vertrauenswürdiges, statisches System zu erstellen.

### *b) Strukturelle Untersuchung:*

Anschließend werden verschiedene Formen mit den selben Anforderungen der Tennishallen untereinander verglichen, um die ersten Schritte zur Optimierung der Formfindung festzulegen.

### *c) Schlussfolgerung:*

Die in a) und b) erzielten Ergebnisse und Zusammenhänge sollen kritisch bewertet und auf Plausibilität überprüft werden. In einer Zusammenfassung sind Schlussfolgerungen zu diskutieren und aufzulisten. Für die weitere Forschung sollen Problemstellungen und Schlussfolgerungen formuliert werden.

Ausgestellt: 04. Juni 2009

Einzureichen am: 04. Oktober 2009

Prof. Dr.-Ing. Peer Haller  
Verantwortlicher Hochschullehrer  
TU-Dresden

Prof. Yves Weinand  
Verantwortlicher Hochschullehrer  
EPF Lausanne





## **Selbständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage dem Prüfungsausschuss der Fakultät Bauingenieurwesen eingereichte Diplomarbeit zum Thema

Analyse und Beschreibung eines räumlichen Tragwerks aus Massivholzplatten

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Dresden, den 28.08.2009

Unterschrift



## **Danksagung**

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen eines Forschungsprojekts am Institut für Holzkonstruktionen IBOIS an der Ecole Polytechnique Federale de Lausanne EPFL in der Schweiz.

Hiermit möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des IBOIS für ihre Unterstützung bei meiner Arbeit und die freundliche Aufnahme in ihrem Team bedanken. Im speziellen möchte ich meinem Betreuer Johannes Natterer danken, der mir stets mit Rat zur Seite stand und mich in entscheidenden Situationen ermutigt und aufgebaut hat.

Für die Fortführung des Projekts wünsche ich dem gesamten Team des IBOIS viel Erfolg.

Desweiteren danke ich Prof. Dr.-Ing. Peer Haller vom Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und baukonstruktives Entwerfen der Fakultät Bauingenieurwesen an der TU Dresden für seine Unterstützung und die Vermittlung zum IBOIS.

Ein großer Dank gilt auch dem Büroteam der Dynamic Designer in Dresden, die mir einen Arbeitsplatz zur Verfügung stellten und mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mein größter Dank gilt meiner gesamten Familie, die mich stets bedingungslos unterstützt hat und ohne die diese Diplomarbeit nicht möglich gewesen wäre.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Beitrag dieser Arbeit . . . . .	2
1.3	Gliederung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Faltwerke . . . . .	4
2.1.1	Faltwerke im Ingenieurwesen . . . . .	4
2.1.2	Origami-Faltwerke . . . . .	7
2.2	Massivholzplatten aus Brettspertholz . . . . .	10
2.3	Bisherige Erkenntnisse . . . . .	13
2.3.1	Prototyp des IBOIS . . . . .	13
2.3.1.1	Numerische Modellierung und Vergleich . . . . .	14
2.3.1.2	Vergleich Prototyp / Berechnung . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Der Entwurf einer Tennishalle</b>	<b>18</b>
3.1	Allgemeine Angaben . . . . .	18
3.2	Plattendicke . . . . .	19
3.3	Lastfälle . . . . .	19
3.3.1	Eigengewicht . . . . .	19
3.3.2	Schneelast . . . . .	20
3.3.3	Lastkombinationen . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Modellierung und Einstellungen</b>	<b>22</b>
4.1	Modellierung der Struktur . . . . .	22
4.1.1	Materialeigenschaften . . . . .	22
4.1.2	Lagerbedingungen . . . . .	23
4.1.3	Eingabe der Lasten . . . . .	23
4.1.4	Definition der Schnittgrößen . . . . .	24
4.1.5	Lokale Koordinatensysteme . . . . .	24
4.1.5.1	In den Flächen . . . . .	24
4.1.5.2	An den Anschlußkanten . . . . .	25
4.2	Ermittlung der erforderlichen Einstellungen und Voruntersuchungen . . . . .	26
4.2.1	Liniengelenke . . . . .	27
4.2.2	Wahl eines geeigneten Netzes aus finiten Elementen . . . . .	28
4.2.2.1	Anwendung auf Knoten . . . . .	29
4.2.2.2	Anwendung auf die Linien . . . . .	32

4.3	Weitere Problemstellungen . . . . .	34
4.3.1	Spannungsspitzen an den Knotenpunkten . . . . .	34
4.3.2	Momente in gelenkigen Verbindungen . . . . .	36
4.4	Zusammenfassung der Einstellungen . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Vergleich der Berechnungen</b>	<b>39</b>
5.1	Verformungen . . . . .	39
5.2	Grundschnittgrößen . . . . .	42
5.3	Spannungen . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Plattennachweise</b>	<b>46</b>
6.1	Nachweisführung nach DIN 1052:2004-08 . . . . .	46
6.2	Steifigkeitswerte der BSP-Platte . . . . .	49
6.3	Nachweise und Vergleich . . . . .	52
6.3.1	Kombination der Schnittgrößen . . . . .	52
6.3.2	Verwendung der Nachweistabellen . . . . .	54
6.3.3	Vergleich der Nachweise . . . . .	56
6.3.3.1	Fläche 007 . . . . .	56
6.3.3.2	Fläche 027 . . . . .	58
6.4	Gewonnene Erkenntnisse . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Die Linienverbindungen</b>	<b>62</b>
7.1	Zusammenstellung der zu übertragenden Kräfte . . . . .	62
7.1.1	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	63
7.1.2	Umrechnung der lokalen Normal- und Querkräfte . . . . .	64
7.2	Verbindungsausführung . . . . .	67
7.2.1	Gelenkige Verbindung . . . . .	67
7.2.2	Steife Verbindung . . . . .	68
7.2.3	Allgemeine Geometrische Angaben . . . . .	69
7.3	Vorgehensweise bei der Nachweisführung . . . . .	70
7.3.1	Verwendung der Schnittkraftverläufe . . . . .	70
7.3.2	Verwendung der Johannsen-Theorie . . . . .	71
7.3.3	Winkel zur Faserrichtung der Einzellage . . . . .	72
7.3.4	Verwendung der Eingabetabellen . . . . .	75
7.3.4.1	Übertragung des Biegemoments . . . . .	75
7.3.4.2	Übertragung der Querkraftresultierenden R . . . . .	80
7.3.4.3	Übertragung der Normalkraft . . . . .	80
7.4	Nachweise einer ausgewählten Verbindung . . . . .	82
7.4.1	gelenkig . . . . .	82
7.4.1.1	Bereich A <sub>1</sub> . . . . .	83
7.4.1.2	Bereich A <sub>2</sub> . . . . .	83
7.4.1.3	Bereich A <sub>3</sub> . . . . .	84
7.4.1.4	Verbindungsmittelabstände . . . . .	84
7.4.2	steif . . . . .	86
7.4.2.1	Bereich A <sub>1</sub> . . . . .	86

7.4.2.2	Bereich $A_2$ . . . . .	88
7.4.2.3	Bereich $A_3$ . . . . .	89
7.4.3	Vergleich mit Verbindung aus dem Zentrum . . . . .	90
7.4.3.1	gelenkig . . . . .	90
7.4.3.2	steif . . . . .	91
7.5	Zusammenfassung . . . . .	91
<b>8</b>	<b>Vorschläge für eine strukturelle Optimierung des Entwurfs</b>	<b>92</b>
8.1	Veränderter Plattenaufbau . . . . .	92
8.2	steife Verbindungen im Randbereich . . . . .	93
8.3	Abgestützter Randbereich . . . . .	93
8.4	Engere Faltung am Rand . . . . .	94
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>96</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	96
9.2	Kritische Betrachtung . . . . .	96
9.3	Ausblick . . . . .	97
<b>A</b>	<b>Graphische Gegenüberstellung der Schnittgrößen</b>	<b>99</b>
A.1	Moment $m_x$ . . . . .	99
A.2	Normalkraft $n_x$ . . . . .	100
A.3	Querkraft $v_x$ . . . . .	100
A.4	Moment $m_y$ . . . . .	101
A.5	Normalkraft $n_y$ . . . . .	101
A.6	Querkraft $v_y$ . . . . .	102
A.7	Schubmoment $m_{xy}$ . . . . .	102
A.8	Schubkraft $n_{xy}$ . . . . .	103
<b>B</b>	<b>Plattennachweise</b>	<b>104</b>
B.1	Plattensteifigkeiten . . . . .	105
B.2	Schnittgrößenzusammenstellungen . . . . .	108
B.2.1	Fläche 007 . . . . .	108
B.2.2	Fläche 027 . . . . .	112
B.2.3	Fläche 134 . . . . .	114
B.2.4	Fläche 139 . . . . .	116
B.3	Nachweistabellen . . . . .	118
B.3.1	Fläche 007, gelenkige Verbindungen . . . . .	118
B.3.2	Nachweise in den Vergleichsflächen . . . . .	124
B.3.2.1	Fläche 134 . . . . .	124
B.3.2.2	Fläche 139 . . . . .	125
<b>C</b>	<b>Verbindungsnachweise</b>	<b>126</b>
C.1	Verbindungslinie 021, gelenkige Verbindung . . . . .	126
C.1.1	Schnittgrößen . . . . .	127
C.1.2	Nachweistabellen . . . . .	128

C.2	Verbindungslinie 021, steife Verbindung . . . . .	134
C.2.1	Schnittgrößen . . . . .	134
C.2.2	Nachweistabellen . . . . .	136
C.3	Vergleichsdiagramme zwischen Verbindung 021 und 933 . . . . .	148
C.3.1	gelenkige Ausführung . . . . .	148
C.3.2	steife Ausführung . . . . .	149
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>151</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Holz als ökologischer Werkstoff rückt seit einiger Zeit wieder verstärkt in das Blickfeld von Architekten und Planern. Neueste Entwicklungen auch im Bereich des Brandschutzes eröffnen vielseitige neue Möglichkeiten für die Errichtung interessanter Gebäude. Der Baustoff Holz bietet dabei sowohl statische als auch bauphysikalische und ökonomische Eigenschaften, die es gegenüber den weitläufig etablierten Baumaterialien Beton und Stahl durchaus konkurrenzfähig machen. Als nachwachsender Rohstoff, in dem große Mengen Kohlenstoffdioxid gespeichert werden, kann die gezielte und verantwortungsbewußte Nutzung von Holz auch einen Teil zur Lösung der aktuellen Umweltproblemen beitragen. Mit zunehmender Sensibilisierung der Öffentlichkeit stößt der Holzbau auch zunehmend bei den Bauherren auf gesteigertes Interesse.

Mit der Entwicklung der Brettsperrholzplatte wurde Ende der neunziger Jahre ein neuer Holzwerkstoff auf den Baupmarkt eingeführt, der Architekten und Ingenieuren vollkommen neue Möglichkeiten bei der Planung von Holzbauwerken bietet. Heute werden diese Platten bereits vielfach als Wand- und Deckenelemente verbaut. Dabei wirken diese Bauteile vor allem als Scheiben und Platten. Mit zunehmenden Kenntnissen über die Wirkungsweise und Tragfähigkeit von Brettsperrholzplatten kommt dieser Holzwerkstoff auch immer mehr für andere Anwendungen im Ingenieurholzbau in betracht. Insbesondere für die Konstruktion weitgespannter Faltwerke, gefaltete Strukturen, in denen die Lasten überwiegend über Scheibenschnittgrößen abgetragen werden, stellen diese Massivholzplatten eine interessante Alternative dar.

Am Lehrstuhl für Holzkonstruktionen der Ecole Polytechnique Federale de Lausanne EPFL, dem IBOIS, wird nach neuen Möglichkeiten der Verwendung von Brettsperrholzplatten im Bauwesen gesucht. Eine Forschungsarbeit beschäftigt sich dabei mit den Möglichkeiten, die Eigenschaften und Formgebungsmöglichkeiten der japanischen Faltkunst Origami auf Faltwerke aus Massivholzplatten zu übertragen. Durch Belastungsversuche an einem Versuchsmodell konnten interessante Tragfähigkeiten festgestellt werden. Ziel ist es nunmehr, die Tragwirkung dieser Strukturen besser zu verstehen und mit Hilfe von Finite-Elementen-Programmen berechnen zu können. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Verbindungen entlang der Faltwerkskanten. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können im Anschluß strukturelle Modifikationen an den Faltwerken vorgenommen werden, die die Tragfähigkeit erhöhen und optimieren.

## 1.2 Beitrag dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll der Entwurf einer Tennishalle berechnet werden. Dabei soll stets zwischen der Berechnung mit gelenkigen Linienanschlüssen zwischen den Platten und der Berechnung mit steifen Anschlüssen unterschieden werden. Es werden die Unterschiede im Tragverhalten der beiden Varianten miteinander verglichen und deren Vor- und Nachteile erörtert. Ein wichtiger Schritt vor der Berechnung ist die numerische Modellierung mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode. Es werden verschiedene Probleme bei der Berechnung mit einem Finite-Elementen-Programm, kurz FE-Programm, benannt und Lösungsansätze vorgeschlagen. Anschließend können die Berechnungen durchgeführt werden. Mit den Ergebnissen können Bereiche sondiert werden, die besonders hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Neben den Nachweisen in ausgewählten Plattenelementen ist die Berechnung der Verbindungen zwischen den Platten ein bedeutender Teil dieser Arbeit. Es wird für jeden der beiden unterschiedlichen Verbindungstypen gelenkig und steif ein Verbindungsaufbau vorgeschlagen und erläutert. Die Bemessungsvorschläge werden anhand von einem Beispiel angewandt, mit dem Ziel, zu zeigen, dass die auftretenden Schnittgrößen mit den vorgeschlagenen Verbindungsausführungen übertragen werden können.

Mit der Auswertung der Berechnungsergebnisse können Problembereiche in dem faltwerk erkannt und Lösungsansätze erarbeitet werden. Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden Vorschläge zur Optimierung des Tragwerks unterbreitet, mit denen in einer anschließenden Arbeit weitere Vergleichsrechnungen durchgeführt werden können.

## 1.3 Gliederung

Den ersten Teil der vorliegenden Arbeit bildet Kapitel 2 mit der Beschreibung von Faltwerken und im speziellen der hier betrachteten Form der Origami-Faltwerke. Es werden bestimmte Faltmuster dargestellt, die für die Verwendung in Tragwerken aus Massivholzplatten in betracht kommen. Anschließend werden die verwendeten Massivholzplatten aus Brettspertholz beschrieben. Es folgt eine kurze Dokumentation eines Belastungstests an einem Prototypen, mit dem in einer Versuchsreihe am IBOIS die Tragfähigkeit von Origami-Faltwerken erwiesen werden konnte.

Im anschließenden Kapitel 3 erfolgt eine Beschreibung des Entwurfs der Tennishalle mit seinen Strukturdaten und den betrachteten Lastfällen. Kapitel 4 beschäftigt sich ausführlich mit der numerischen Modellierung des Tragwerks im verwendeten Statikprogramm und mit den auftretenden Problemen bei der Verwendung der Finite-Elementen-Methode. Im Abschluß dieses Kapitels werden die getroffenen Einstellungen zusammengefasst, mit denen im Anschluß die Berechnungen an den beiden Modellvarianten durchgeführt werden. Diese Einstellungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit beibehalten und nicht verändert. Die Ergebnisse der Berechnung werden im Anschluß in Kapitel 5 miteinander verglichen. Dabei liegt das Augenmerk auf den berechneten Verformungen und den auftretenden Schnittgrößen und Spannungen. Im Kapitel 6 werden anhand der graphischen Darstellung der auftretenden Schnittgrößen zwei Platten ausgewählt, an denen für beide Berechnungsvarianten die Nachweise der Spannungen nach der DIN 1052:2004-8 durchgeführt werden. Dabei werden die Ergebnisse der Nachweise sowohl zwischen gelenkigen

und steifen Verbindungen, als auch zwischen dem Randbereich im Bogen und dem Zentrum der Struktur verglichen.

Es folgt der Teil, in dem die Verbindungen zwischen den Platten genauer betrachtet werden. Dafür sind einige Vorbetrachtungen für die Verwendung der berechneten Schnittgrößen zu treffen. Der Anfang von Kapitel 7 erläutert daher ausführlich, wie die erhaltenen Schnittgrößen behandelt werden müssen, um sie für die Bemessung der Verbindungen brauchbar zu machen. Nachdem dies geschehen ist, werden zwei Ausführungsvarianten für eine gelenkige und eine steife Verbindung vorgeschlagen und beschrieben. Nach einer allgemeinen Beschreibung der Nachweisführung wird diese an einer ausgewählten Verbindung in der Struktur durchgeführt. Auch hier findet neben den Vergleichen gelenkig-steif eine Gegenüberstellung zwischen Randbereich und Zentrum im Faltwerk statt.

Die Erkenntnisse aus all den vorhergegangenen Betrachtungen werden in Kapitel 8 zur Entwicklung einiger Optimierungsvorschläge herangezogen. Dabei wird auch noch einmal auf die Vor- und Nachteile der Verwendung von gelenkigen beziehungsweise biegesteifen Verbindungen eingegangen. Den Abschluß bildet eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und ein Ausblick auf weitere Forschungsschwerpunkte, die im Anschluß an diese Arbeit zu betrachten sind.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Faltwerke

Ein Faltwerk ist definiert als ein räumliches Gebilde, das aus ebenen Flächenelementen besteht, welche entlang ihrer Kanten miteinander verbunden sind und dadurch eine räumliche Tragwirkung erzielen. Durch die Faltung erhalten ursprünglich dünne flache, und somit biegeeweiche, Flächen eine gewisse Steifigkeit. Je enger die Faltung ist, um so höher wird die Steifigkeit. Das Tragprinzip von Faltwerken kann gut an einem Blatt Papier veranschaulicht werden. Dies geschieht mit Hilfe der Abbildung 2.1. Ein einfaches Blatt Papier biegt sich bereits bei Eigengewicht durch. Werden jedoch wie im zweiten Bild Falten in der Haupttragrichtung angeordnet, so lassen sich bereits äußere Lasten abtragen. Diese Lasten können sogar noch gesteigert werden, wenn zusätzlich zu den Faltungen noch die Schubverformungen am Rand behindert werden. Somit wird auch der entscheidende Vorteil der Faltwerke klar. Mit ihnen können bei relativ dünner Bauteildicke relativ große Spannweiten realisiert werden. Neben der Materialersparnis ist das geringe Eigengewicht ein wichtiger Faktor, der in einigen Bereichen des Ingenieurbaus ausgenutzt wird.

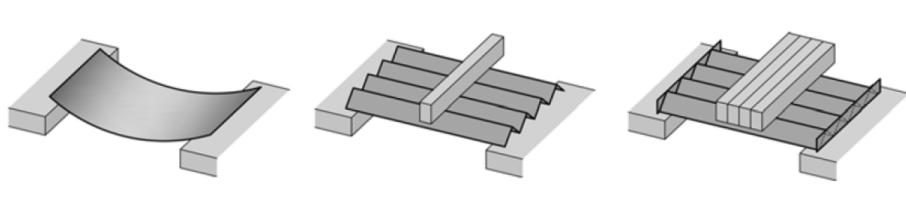


Abb. 2.1: Veranschaulichung der Steifigkeitsgewinnung durch Faltung an einem Stück Papier [1]

Wie viele Konstruktionsprinzipien des modernen Ingenieurbaus, so hat auch das Faltwerk seine Vorbilder in der Natur. So erhalten beispielsweise Insektenflügel durch deren Faltung eine Steifigkeit und Stabilität bei geringem Eigengewicht, die es dem Insekt erst ermöglicht zu fliegen. Gleichzeitig lassen sich diese Flügel einfach und platzsparend zusammenfalten. Auch in Blättern von Pflanzen findet sich das Prinzip der Steifigkeitsgewinnung durch Faltung wieder. So weisen beispielsweise Blätter der Buche oder Palmenblätter klare Faltstrukturen auf, die dem Blatt ebenfalls Stabilität verleihen.

#### 2.1.1 Faltwerke im Ingenieurwesen

Das Prinzip der Faltwerke wird heutzutage in vielfältiger Form ausgenutzt. Die einfachste Anwendung sind gefaltete Stahlträger wie beispielsweise das C- oder das Z-Profil. Ein weiteres bekanntes Beispiel sind Wellbleche oder Trapezprofile auf Hallendächern. Sie können in unterschiedlichen Abmessungen und Formen hergestellt und somit den konstruktiven Ansprüchen angepasst werden.

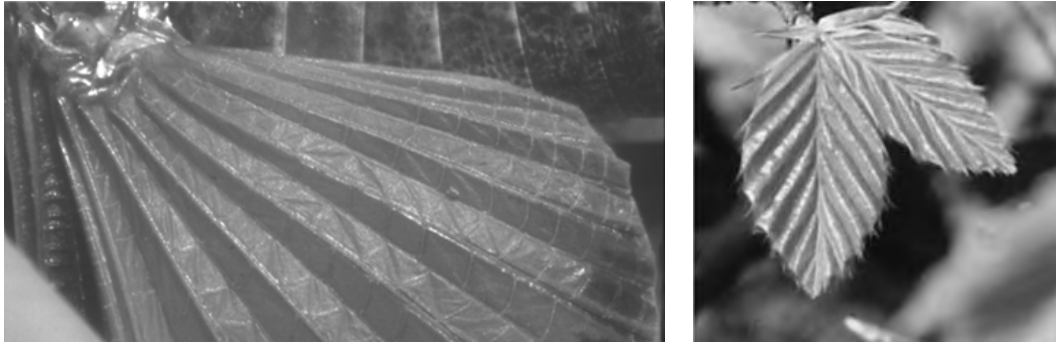


Abb. 2.2: Beispiele natürlicher Faltwerke: Insektenflügel (links) und Buchenblatt (rechts) [1]

Zusätzlich werden in die Trapezbleche gegebenenfalls sogenannte Sicken angeordnet, die weitere Laststeigerungen ermöglichen, indem sie die Bleche zusätzlich gegen Beulen aussteifen. Gefaltete Profile aus Stahlblech in größerem Maßstab sind Spundwände, mit denen Baugruben abgesichert werden. Mit ihnen können die hohen auftretenden Erddruckkräfte sicher und materialsparend aufgenommen werden. Dadurch, dass die Materialdicke relativ gering gehalten werden kann, können die Stahlprofile bis zur gewünschten Tiefe in die Erde gerammt werden. Im Stahlbau werden ebenfalls Faltungen zur Aussteifung von Bauwerken verwendet. So werden im Brückenbau bei der orthotropen Fahrbahnplatte zum Aussteifen Trapezprofile unter die Fahrbahnplatte angeschweißt. In Hohlkästen erfüllen diese Profile ebenfalls die Funktion als Beulsteife. Der Vorteil der Materialeffizienz wird auch im Maschinen- und Flugzeugbau ausgenutzt. In Flugzeugrümpfen werden Aluminiumprofile aufgenietet, die extrem leicht sind und dem Bauteil dennoch eine große Steifigkeit verleihen. Auch die großen Stahlplatten aus dem Schiffsbau erhalten ihre Stabilität aus aufgeschweißten gefalteten Stahlblechen.



Abb. 2.3: Gefaltete Spundwände [2] und Trapezprofile unter Fahrbahnplatte [3]

Im Hochbau finden sich großformatige Faltwerke vor allem in Dachkonstruktionen wieder. Besonders durch die Entwicklung des Stahlbetons und der damit verbundenen Entstehung großer Flächentragwerke gewannen auch Faltwerke an Bedeutung. So entstanden in den sechziger Jahren erste Dachkonstruktionen in Form von Faltwerken. Die aufwendigeren Schalungsausführungen können durch Vorfertigungsprozesse ausgeglichen werden.

In der Tragwerkslehre werden allgemein vier Tragwerkstypen unterschieden. Je nach Art der Kraftableitung wird kategorisiert in:

- Formaktive Tragsysteme (Stützbogen, Hängeseil)

- Vektoraktive Tragsysteme (Fachwerkträger, Dreieckbinder)
- Schnittaktive Tragsysteme (Balken, Rahmen, Platte)
- Flächenaktive Tragsysteme (Scheibe, Platte, Schale)

Faltwerke werden dabei in die Kategorie der flächenaktiven Tragwerke eingeordnet, das bedeutet, dass hier die Kraftumlenkung vor allem durch die Form stattfindet. Angreifende Kräfte werden über die gesamte Fläche verteilt und abgetragen. Es wirken überwiegend Membrankräfte, also Kräfte, die parallel zur Fläche wirken. Sollen zu diesen Zug und Druckkräften zusätzlich Biegemomente übertragen werden, so muss ein dickerer Querschnitt gewählt werden. Bisher wurden Faltwerke in drei verschiedene Gruppen eingeteilt, und zwar in prismatische, pyramidische und in halbprismatische Faltwerke. Aufgrund neuester Modellierungsmöglichkeiten und der daraus folgenden Entwicklung wurden äußerst komplexe Faltwerke entworfen und teilweise auch bereits realisiert. Diese lassen sich jedoch nicht mehr so leicht in die bisherigen Gruppen einordnen. K. LEITNER hat daher in ihrer Dissertation zum Thema “Tragkonstruktionen aus plattenförmigen Holzwerkstoffen mit der Textilen Fuge” [4] eine neue Einteilung von Faltwerken vorgeschlagen. Die Einteilung orientiert sich hier an der Anordnung der Linien. Es werden fünf Grundmuster festgelegt, die für die Einordnung weiterer komplexer Faltstrukturen kombiniert und variiert werden können. Diese fünf Grundmuster sind:

1. Faltmuster aus parallelen Geraden
2. Faltmuster aus beliebigen Geraden
3. Faltmuster aus Geradenscharen in drei Richtungen
4. Faltmuster aus Geraden, die sich in einem Punkt schneiden
5. Faltmuster aus n-Ecken

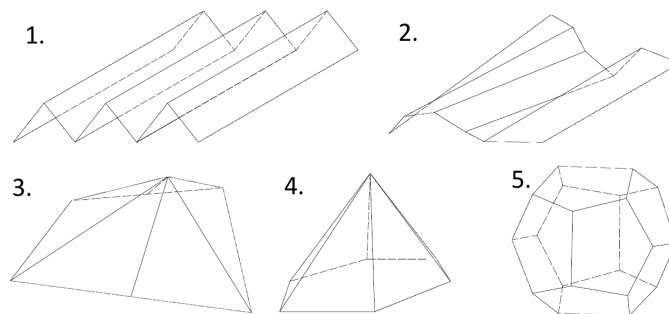


Abb. 2.4: Fünf Grundfaltungsmuster nach K. LEITNER [4]

Diese Grundmuster können laut [4] durch verschiedene Variationen verändert werden. Bei den Strukturen, die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit an Origami-Faltwerken untersucht werden, kommen dabei vor allem zwei Variationen zur Anwendung. Sie werden auf den Grundfaltungstyp 1 angewandt. Zum einen ist das die Gegenfaltung, bei der kurze schräge Falten, die an jeder Längsfalte die Richtung wechseln, im Faltschema angeordnet werden. Entlang dieser Linie wird bei Falten die Faltrichtung der Längsfalten umgekehrt. Zu sehen ist das an einem Beispiel in Abbildung 2.5. Die zweite Variationsart ist die gegenläufige Faltung. Hier verlaufen schräge gegenläufige Faltungen in Längsrichtung der Grundfaltwerksfläche. Das untere Bild in Abbildung 2.5 zeigt ebenfalls ein Beispiel.

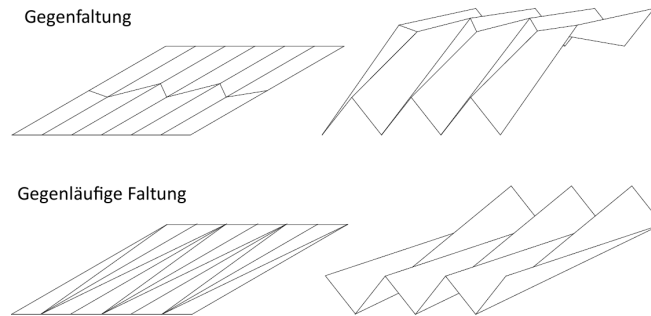


Abb. 2.5: Variation durch Gegenfaltung (oben) und Variation durch Gegenläufige Faltung (unten) [4]

### 2.1.2 Origami-Faltwerke

Eine interessante Art neue Entwürfe für Faltstrukturen zu entwickeln, ist die japanische Faltkunst des Origami. Der Begriff Origami setzt sich aus zwei Wörtern zusammen: “Ori” bedeutet Falten und “Kami” steht für Papier. Das Papierfalten diente in Japan ursprünglich rein spirituellen Zwecken, da Papier bis zur industriellen Herstellung äußerst teuer war. Den Kriegern sollten gefaltete Figuren in der Schlacht Glück bringen. Eine japanische Legende besagt, dass einem von den Göttern ein Wunsch erfüllt wird, wenn man eintausend Papierkraniche faltet. Die Japanerin SADA KO SASAKI, die Opfer eines amerikanischen Atombombenangriffs wurde, versuchte damit gegen die Folgen der Strahlung anzukämpfen. Heute zieren hunderte Papierkraniche ihre Statue in Seattle und wurden somit zu einem Symbol der Friedensbewegung. Neben Tierdarstellungen wurden auch Verpackungen aus Papier gefaltet, die dadurch meist einen höheren Wert hatten als der entsprechende Inhalt. Mit der industriellen Herstellung von Papier wurde Origami immer populärer und weit verbreitet. Der Japaner AKIRA YOSHIZAWA begann gegen Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts damit, neue und innovative Modelle zu entwickeln. Er etablierte zudem ein System für Faltanleitungen, die allgemein verständlich waren. Durch zwei Ausstellungen in New York und Amsterdam wurde Origami schließlich weltweit bekannt und es setzte ein regelrechter Wettkampf ein, in dem immer neue Modelle entstanden. ERIK DEMAINE führte am Massachusetts Institute of Technology (MIT) Untersuchungen auf mathematischer Ebene durch, die fortan auch in technischen Entwicklungen Anwendung fanden.

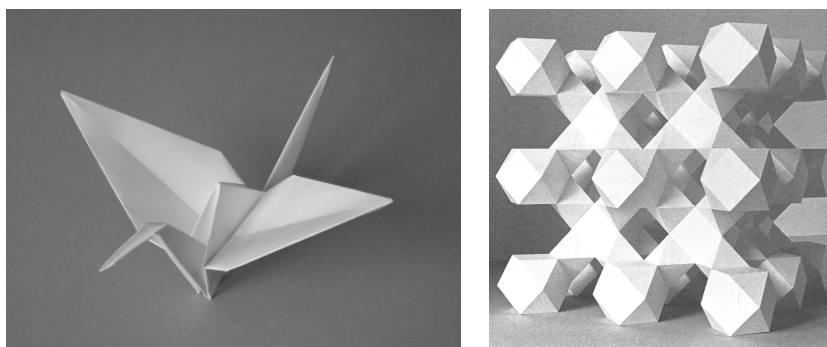


Abb. 2.6: Origami-Kranich [5] und modulares Origami [?]

Allgemein kann Origami in drei Grundtypen eingeteilt werden.

*Klassisches Origami* beinhaltet das Darstellen von Figuren. Durch gekonntes Falten werden Menschen, Tiere, Pflanzen und Objekte nachgebildet. Ausgangspunkt ist oft ein quadratisches Blatt Papier, dass ohne Zuhilfenahme von Kleber und Schere zu vereinfachten Darstellungen einer Figur gefaltet wird. Ziel ist keine möglichst genaue Abbildung. Das Objekt soll durch seine wesentlichen Merkmale erkennbar wiedergegeben werden.

Beim *Modularen Origami* geht es hauptsächlich um geometrische Körper. Grundformen wie Vierecke oder Polyeder werden zu räumlichen Gitterstrukturen oder Darstellungen von Molekülen zusammengefügt. Die einzelnen Grundbausteine werden durch ineinander stecken oder kleben zu den räumlichen Gebilden zusammengesetzt.

Auch beim *Mosaik Origami* geht es ausschließlich um geometrische Formen. Zweidimensionale Muster werden auf Papier aufgezeichnet und dieses entlang der Markierungen gefaltet. Dadurch verändert sich das geometrische Muster. Durch diese Faltungen können räumliche Gebilde entstehen, denen durch die Faltung eine eigene Stabilität verliehen wird.

Eine Forschungsarbeit des Architekten H. BURI am IBOIS, dem Lehrstuhl für Holzkonstruktionen der EPFL Lausanne, beschäftigt sich mit den Möglichkeiten, die Origami-Technik auf Konstruktionen aus Brettsper Holzplatten zu übertragen. Gerade das Mosaik-Origami gilt dafür als besonders gut geeignet, da es eine räumliche und gleichzeitig tragende Wirkung erzielt. Ausgangsform dieser Technik bildet die Akkordeonfaltung, wie sie in Abbildung 2.1 und 2.4 zu sehen ist. Sie besteht aus parallelen Tal- und Bergfalten. Bereits diese Grundform lässt durch verschiedene Breiten der Einzelflächen umfangreich variieren. Von dieser Grundform ausgehend werden verschiedene Faltmuster verwendet.

Ein fundamentales Faltmuster ist die sogenannte *Umkehrfaltung*, auf der alle anderen Faltmuster basieren. Das Prinzip der Umkehrfalte entspricht dem der bereits erwähnten Gegenfaltung aus Abbildung 2.5. Durch eine spitze Querfaltung wird die Richtung der Längsfalte verändert und aus einer Bergfalte wird so eine Talfalte und umgekehrt. Die Abbildung 2.7 stellt solch eine Umkehrfaltung mit unterschiedlichen Winkeln räumlich dar.

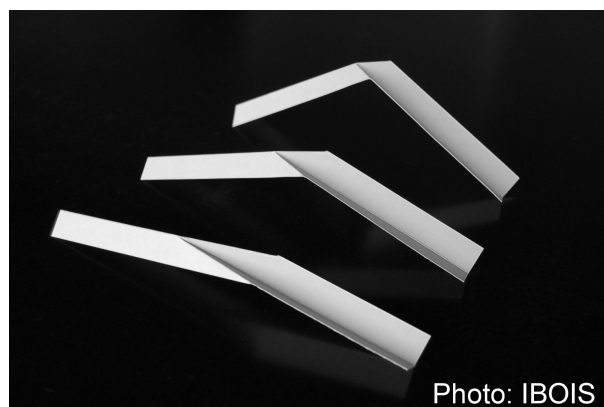


Abb. 2.7: Darstellung einer Umkehrfalte

Ein weiteres Faltmuster ist die *Rautenfaltung*. Eine zweidimensionale Raute wird in der Diagonalen gefaltet. Wenn die vier Seiten der Raute eine Bergfalte und die Diagonale eine Talfalte bilden, entsteht bei einer Aneinanderreihung eine gekrümmte Figur wie in Abbildung 2.8. Durch Variation der Rautengeometrie lässt sich die Krümmung unterschiedlich variieren. Je stumpfer die Rauten



sind, das heißt je kürzer die Diagonalfalte ist, um so stärker wird die Krümmung. Im Prinzip ist eine Rautenfaltung eine Spiegelung einer Umkehrfaltung an der Basis der beiden Seitenschenkel. In einem Rautenfaltwerk finden sich ausschließlich ebene Dreiecksflächen wieder. Sie sind daher gut geeignet für die Verwendung ebener Holzwerkstoffe. Ihre Formenvielfalt und Flexibilität macht sie für die Entwurfsfindung zusätzlich interessant.

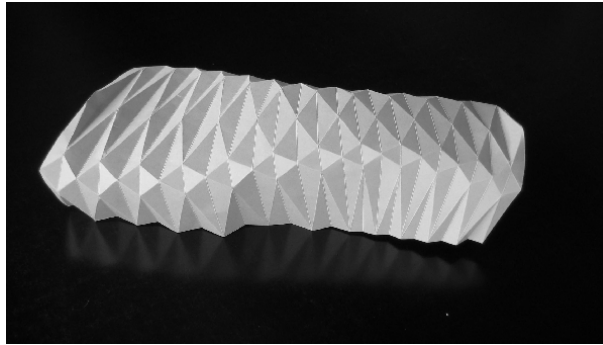


Abb. 2.8: Unregelmäßige Rautenfaltung [6]

Ein anderes interessantes Faltmuster ist die sogenannte *Fischgrätenfaltung*. Auch sie hat als Grundfaltungstechnik die Umkehrfaltung. Diese wird jedoch nicht gespiegelt sondern hintereinander versetzt angeordnet. Durch die wechselnde Abfolge von Berg- und Talfalten entsteht eine zick-zack-formige Linie. Der erzeugte Winkel der jeweiligen Umkehrfaltungen kann variiert werden und die Zick-Zack-Linie somit unterschiedliche Verläufe annehmen. In der Aufsicht ergibt die Aneinanderreihung von Umkehrfaltungen in Längsrichtung zur Fischgrätenfaltung zwei Reihen gespiegelter Trapeze. Legt man mehrere solcher Faltungen nebeneinander, so entstehen ebenfalls Zick-Zack-Linien. Durch den zick-zack-formigen Verlauf der Faltungen in beiden Richtungen lassen sich die Faltmodelle zusammenschieben und komprimieren. Diese Eigenschaft wird zum Beispiel bei Sonnensegeln von Satelliten ausgenutzt, die sich kompakt zusammenfalten lassen und im Weltall schließlich zu einer großen Fläche ausgebreitet werden. Die Entwicklung dieser Technik geht auf die wissenschaftlichen Untersuchungen des Japaners MUIRA zurück, der sich intensiv mit dem Fischgrätenmuster beschäftigt hat. Es wird daher auch als Muira-Ori bezeichnet. Die erwähnten ebenen Trapezflächen machen diese Form der Faltung ebenfalls für die Konstruktion mit Massivholzplatten interessant.

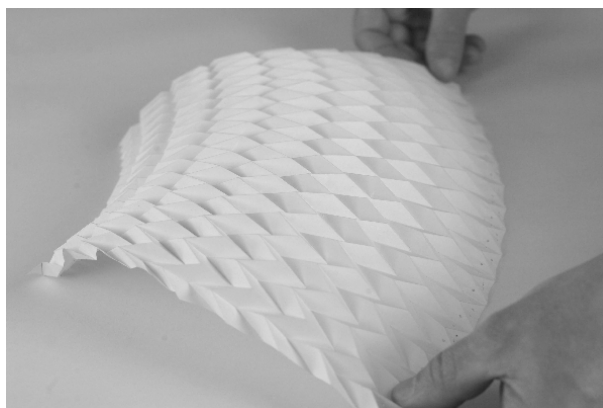


Abb. 2.9: Verformbares Modell mit Fischgrätenfaltung [6]

Als letztes Faltmuster soll hier noch die *Diagonalfaltung* erwähnt werden. Ausgehend von einem

in der Diagonale gefalteten Rechteck, Parallelogramm oder Trapez werden die Außenkanten der Grundform nach oben gezogen. Die Diagonale bildet also wie bei der Rautenfaltung eine Talfalte. Ordnet man mehrere solcher gefalteten Vierecke hintereinander an, so entsteht eine schraubenförmige Struktur. Auf diese einfache Art lassen sich doppelt gekrümmte Flächen erzeugen. Das macht sie für architektonische Entwürfe sehr interessant.

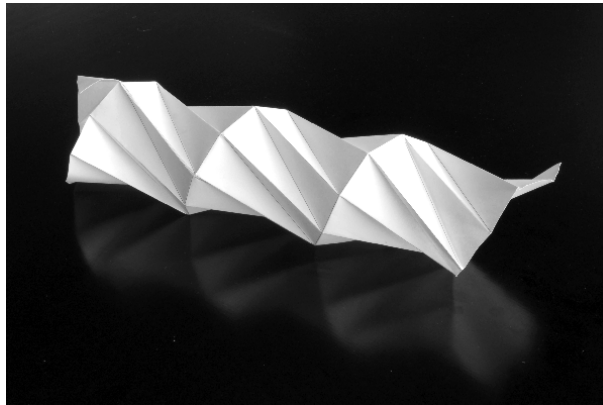


Abb. 2.10: Schraubenförmige Diagonalfaltung

Damit sind die grundlegenden Faltungsmuster beschrieben, die für die Konstruktion aus ebenen Holzwerkstoffen interessant erscheinen.

## 2.2 Massivholzplatten aus Brettsperrholz

Das Brettsperrholz ist ein noch relativ neuer Holzwerkstoff auf dem Baumarkt. Die erste Zulassung erfolgte am Deutschen Institut für Bautechnik DIBt durch die Firma Merk Dickholz im Dezember 1998. Es besteht aus mehreren Schichten miteinander verklebter Brettlagen. Die einzelnen aneinandergereihten Bretter sind so angeordnet, dass die Faserrichtungen benachbarter Schichten rechtwinklig zueinander stehen. Der Querschnittsaufbau einschließlich Faserorientierung, Schichtdicke und Festigkeitsklasse ist symmetrisch zur Mittelebene. Auf diese Weise entstehen flächenhafte großformatige Elemente. Um bei der Wahl der Abmessungen nicht durch die verfügbaren Brettlängen begrenzt zu werden, werden die Bretter an den Stirnseiten mittels einer Keilzinkungsverbindung verbunden. Dadurch können natürlich gegebene Schwachstellen wie Äste entfernt und ein homogenerer Aufbau erzielt werden. Die Abbildung 2.11 zeigt den Aufbau einer fünfschichtigen Brettsperrholzplatte. Die Faserrichtung der Decklagen entspricht auch der Längsrichtung der Platte. In ihrer Länge sind die Platten in der Regel auf 16,5 m begrenzt, teilweise sind jedoch auch Längen von bis zu 30 m möglich. Die Breite liegt in der Regel bei 3,0 m kann aber auch bis zu 4,8 m betragen. Die Begrenzungen der Abmessungen ergeben sich dabei vor allem durch produktions- und transportbedingte Einschränkungen. Die Anordnung der Brettlagen ist bis zu einer Plattendicke von 500 mm möglich, wobei in der Regel ein drei- bis fünfschichtiger Aufbau verwendet wird. Die Bretter der Einzellagen haben eine Breite zwischen 80 und 500 mm bei einer Dicke von 10 bis 40 mm. Es ist ein Verhältnis von Breite zu Dicke  $b/d$  von mindesten 4:1 einzuhalten. Die vorwiegend verwendete Holzart ist Fichte. Unter Umständen kann auch Holz mit höheren Werkstoffkenngrößen wie zum Beispiel Kiefer, aber auch Tanne, Lärche oder Pappel verwendet werden. Das verwendete Holz entspricht dabei in der Regel der

Sortierklasse S 10, teilweise auch S 13. Für die Herstellung von Brettsperrholz werden meist Bretter aus den Stammrandzonen, also sogenannte Seitenware, verwendet. Diese wurde bisher als minderwertig angesehen, da bei Vollholzprodukten bevorzugt das Kernholz verwendet wird. Dieses hat günstigere Quell- und Schwindeigenschaften als Holz aus den Randbereichen des Stammes. Diese Nachteile der Seitenware werden bei Brettsperrholz allerdings dadurch aufgehoben, dass die kreuzweise Verleimung der Einzelbretter die Quell- und Schwindverformungen behindert. Man spricht auch von sperren, wovon sich auch die Bezeichnung des Werkstoffs ableitet. Somit kann durch die Verwendung der Seitenware in Brettsperrholz dazu beigetragen werden, den Querschnitt eines Baumes effizienter auszunutzen.

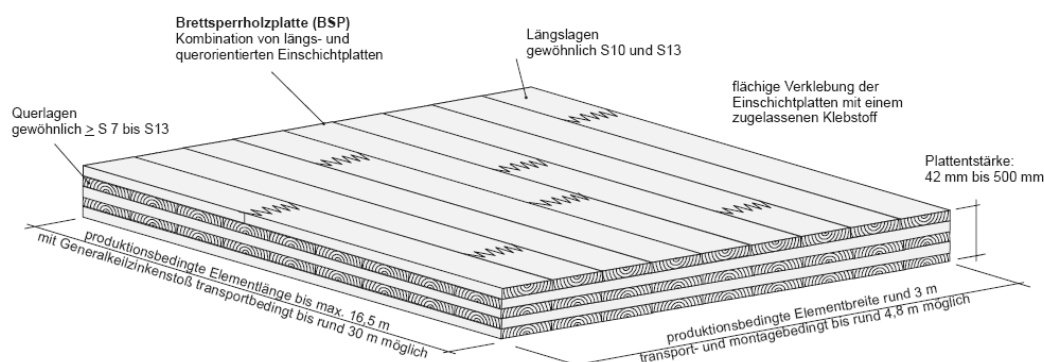


Abb. 2.11: Aufbau einer Brettsperrholzplatte [1]

Allgemein werden an das Produkt und die Herstellung folgende Anforderungen gestellt. Zum einen ist der Abstand zwischen den Einzelbrettern auf 6 mm zu beschränken, vorzugsweise sind 2 mm einzuhalten. Für die Keilzinkverbindungen sowie für die Flächenverklebungen sind geeignete und bauaufsichtlich zugelassene Klebstoffe zu verwenden. Die Rollschubfestigkeit zwischen zwei Lagen muss mindestens  $0,7 \text{ N/mm}^2$  betragen. Die Produzenten müssen werkseigene Produktionskontrollen inklusive einer Beschreibung und Überprüfung des Ausgangsmaterials durchführen. Kontrollen, Prüfungen und zugehörige Dokumentationen während der Herstellung sowie am fertigen Produkt sind gefordert. Zudem ist zweimal jährlich eine Fremdüberwachung durch unabhängige Institute zu ermöglichen.

Die so erhaltenen Massivholzplatten werden bevorzugt bei Wand-, Dach- und Deckenkonstruktionen eingesetzt. Durch einen hohen Vorfertigungsgrad bietet die Holz-Massivbauweise eine interessante Alternative zur Holz-Leichtbauweise. In Brettsperrholzplatten vereinigen sich statische, bauphysikalische und architektonische Aspekte in einem Element. Sie können als tragende, nichttragende und aussteifende Bauteile verwendet werden. Mit Hilfe computergesteuerter Verfahren können diese im Fertigungswerk einschließlich erforderlicher Öffnungen für Fenster und Türen zurechtgeschnitten werden und brauchen auf der Baustelle nur noch montiert zu werden. Ein anschauliches Beispiel hierfür liefert das Atelierhaus in Dresden Hellerau, das am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und baukonstruktives Entwerfen von Prof. Dr.-Ing. Peer Haller am Institut für Stahl- und Holzbau der TU Dresden konzipiert und geplant wurde. Diese Komponentenbauweise hat den Vorteil, dass durch die Vorfertigung die Montagezeiten auf der Baustelle deutlich verkürzt werden und somit erhebliche Kostenersparnisse erzielt werden können.

Durch die Kombinationsvielfalt bei der Querschnittszusammensetzung und einer großen Anzahl

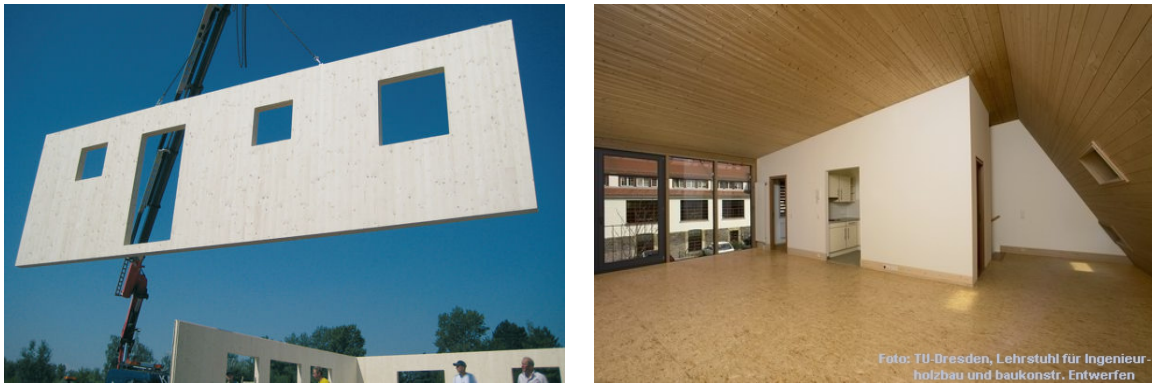


Abb. 2.12: Vorgefertigte Massivholzplatte [7] und Innenansicht des Atelierhauses Hellerau [8]

unterschiedlicher Hersteller gibt es bisher keine einheitlichen Bemessungsgrundlagen, wie es sie beispielsweise bei Brettschichtholz gibt. Vielmehr wird jedes einzelne Produkt über bauaufsichtliche Zulassungen bemessen. Eine einheitliche Aufbereitung der Eigenschaften für allgemeine vereinheitlichte Plattenaufbauten ist daher für die Zukunft erforderlich, um den Ingenieuren ein allgemein gültiges Bemessungsverfahren zur Verfügung zu stellen zu können. Zur Zeit befindet sich das Produkt Brettspertholz in zwei Konstruktionsnormen wieder. Zum einen erscheinen Brettspertholzplatten im Kapitel “Deckplatten aus kreuzweise angeordneten Lamellen, Brettspertholz” des “Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten - Teil 2: Brücken”. In der DIN 1052:2004 “Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau” zum anderen wird im Kapitel 7 für den Nachweis der Verwendbarkeit auf die bauaufsichtlichen Zulassungen verwiesen. Im Anhang D sind Verfahren zur Ermittlung der Steifigkeitswerte der Platten sowie Nachweisverfahren für kreuzweise geschichtete Scheiben- und Plattenelemente aufgeführt. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

Bei der Tragwirkung der Brettspertholzplatten wird zwischen Scheibentragwirkung und Platten-tragwirkung unterschieden. Sie ist dabei stark von der Beanspruchungsrichtung abhängig. Durch die orthotropen Materialeigenschaften des Ausgangsproduktes Holz hat auch die Massivholzplatte ein orthotropes Trag - und Verformungsverhalten. Die Materialkennwerte in Plattenlängsrichtung sind deutlich höher als in Plattenquerrichtung. In den Querlagen, deren Faserrichtung senkrecht zur Belastungsrichtung steht, sind die Materialwerte so gering, dass sie in der Regel zu null gesetzt werden. Bei der Plattenbeanspruchung ist vor allem die Rollschubfestigkeit in den Querlagen ein wichtiges Kriterium für die Plattenfestigkeit. Für die Berechnung der Schubspannungen kommen verschiedene Verfahren zur Anwendung:

- starre beziehungsweise nachgiebige allgemeine Verbundtheorie
- modifizierte Verbundtheorien
- Schubanalogieverfahren nach Kreuzinger

Die Verfahren, die alle auf vereinfachten Annahmen beruhen, wurden in einer Forschungsarbeit an der TU Graz [9] miteinander verglichen. Für gängige Abmessungsverhältnisse  $l/h > 15$  liegen die Ergebnisse dicht beieinander. Lediglich bei geringeren Verhältnissen  $l/h$  treten größere Unterschiede bei den Berechnungen auf. Für die Berechnung der Scheibentragwirkung wird zurzeit ein einfaches Gitterstabmodell verwendet, in dem die schubweichen Einzelelemente stellvertretend

für die Einzelbretter stehen. An den Verbindungspunkten werden Drehfedern angesetzt. Vergleiche mit Versuchsergebnissen zeigten jedoch große Unterschiede zu den Berechnungsergebnissen. Daher wurden an der TU Graz Forschungen betrieben, um ein analytisches Rechenmodell zu entwickeln, mit dem sich die Schubsteifigkeiten von orthogonalen Gitterstrukturen bestimmen lassen. Dabei stellten sich große Unterschiede zu den Ergebnissen aus dem bisherigen Modell heraus. Mit dem neuen Berechnungsmodell ließen sich die Rechenergebnisse näher an die Versuchsergebnisse angleichen. Als wichtige Einflußgrößen erwiesen sich die Brettdicken- und Brettbreitenverhältnisse sowie die Materialkonstanten der orthotropen Elastizitätstheorie. Die derzeit in den Normwerken verwendeten Vorschläge liefern jedoch ausreichend exakte Ergebnisse, die auf der konservativen Seite liegen.

Der Holzwerkstoff Brettsperrholz liefert neben ökonomischen Vorteilen einige gute konstruktive Eigenschaften für die Konstruktion von faltwerken. Er ist in großen Formaten verfügbar und eignet sich sowohl zur Lastabtragung von Plattenbeanspruchungen als auch von Scheibenbeanspruchungen, die in faltwerken in der Regel vorherrschen. Durch die Möglichkeit der exakten Vorfertigung der Elemente brauchen diese auf der Baustelle nur noch zusammengefügt werden. Die unterschiedlichen Winkel der Faltungen können durch Gehrungsschnitte realisiert werden. Durch das geringe Eigengewicht des Ausgangswerkstoffs Holz haben auch die Platten ein relativ geringes Eigengewicht, was sich gut mit dem Prinzip der faltwerke, einer großen Tragweite bei geringem Materialverbrauch, ergänzt.

## 2.3 Bisherige Erkenntnisse

### 2.3.1 Prototyp des IBOIS

Um die Durchführbarkeit von Origami-faltwerken zu untersuchen wurde am IBOIS ein Modell aus Holzwerkstoffplatten umgesetzt und einigen Belastungstests unterzogen. Der Entwurf für diesen Prototyp basiert auf dem im Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Fischgrätenmuster. Die Basiselemente, aus denen sich die Struktur zusammensetzt, haben alle eine einheitliche Form eines Trapezes mit den Abmessungen aus Abbildung 2.13. Die beiden parallelen Kanten liegen entweder in der längsgerichteten Berg- oder in der Talfalte. Zwei dieser Basiselemente wurden zu einem Grundbaustein, wie er in Abbildung 2.13 zu sehen ist, zusammengefügt. Sie schließen dabei einen Winkel von  $120^\circ$  ein. Durch die unterschiedliche Neigung der schrägen Kanten entstehen bei der Aneinanderreihung der Elemente unterschiedliche Winkel in der Zick-Zack-Linie. Die Differenz dieser beiden Winkel führt in der Summe der Grundbausteine zu einem bogenförmigen Verlauf der Struktur.

Als Werkstoff wurden Birkenperrholzplatten mit einer Dicke von 21 mm verwendet. Aus diesen wurden mit Hilfe computergesteuerter Sägetechnik die Basiselemente geschnitten. Diese wurden anschließend mit Hilfe selbstbohrender Schrauben vom Typ ASSY Zebra 5,0/80 der Marke WÜRTH miteinander entlang der Kante verschraubt. Durch das Zusammensetzen der Grundbausteine ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Öffnungswinkel ein Bogen mit einer Spannweite von 6,70 m und einer Höhe von 2,70 m. Der Prototyp bestand aus sechs solch aneinandergereihten

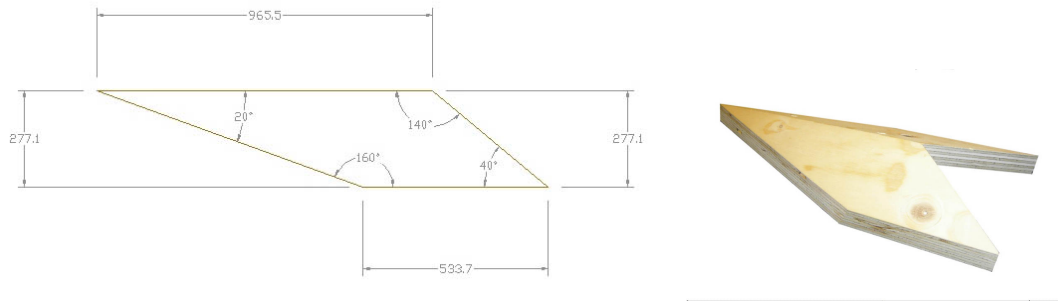


Abb. 2.13: Basiselement für den Prototyp [10] und Grundbaustein aus zwei Basiselementen [11]

Bögen und erreichte so eine Länge von 2,60 m. Der gesamte Prototyp ist in Abbildung 2.14 dargestellt.



Abb. 2.14: Prototyp mit Versuchsanordnung [IBOIS]

### 2.3.1.1 Numerische Modellierung und Vergleich

Parallel zu den Versuchen am Prototypen wurden Berechnungen mit Hilfe der drei Finite-Elemente-Programme SAP2000 V9.16, RFEM und ANSYS durchgeführt und untereinander verglichen. Für den Umfang dieser ersten Voruntersuchung schien die Berücksichtigung der orthotropen Materialeigenschaften ungerechtfertigt, daher wurden folgende vereinfachte isotropische Eigenschaften für die Berechnung verwendet:

- E-Modul  $E = 8.243 \text{ N/mm}^2$
- G-Modul  $G = 350 \text{ N/mm}^2$
- Poissonzahl  $\nu = 0,50$

Im Rahmen der Studie wurden vier Lastfälle miteinander verglichen. Die Positionen der Lastenleitung und der Messpunkte sind in Abbildung 2.15 dargestellt. In den Messpunkten 1 bis 4 (Noeud 1 bis Noeud 4) wurden die vertikalen Verformungen für den Vergleich mit den Computerberechnungen aufgenommen. Die aufgebrachten Lasten waren je Lastfall:

- Last auf dem First:  $4 \times 1.0 \text{ kN}$  (Charge Faîtes)
- Last Nord:  $2 \times 2.2 \text{ kN}$  (Charge Nord)

- Last Süd: 3 x 2.2 kN (Charge Sud)

Den vierten Lastfall bildete das Eigengewicht mit einer Dichte von 500 kg/m<sup>3</sup>.

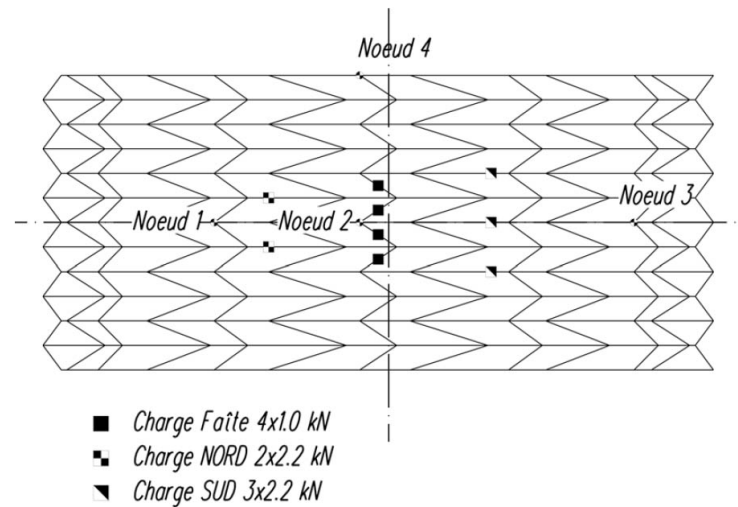


Abb. 2.15: Lastfälle und Verformungsmesspunkte am Prototyp [10]

Das Modell in den FEM-Programmen wurde mit zwei unterschiedlichen Bedingungen an den Verbindungskanten durchgerechnet. Zum einen wurden vollkommen gelenkige Verbindungen angenommen, das heißt, dass sich die Elemente an den Kanten frei verdrehen können, und zum anderen wurden die Verbindungen vollkommen steif modelliert, eine Verdrehung an den Kanten somit behindert. Die Lagerbedingungen wurden stets als gelenkige Linienlager angenommen.

Tabelle 2.1 stellt die Ergebnisse für die vier Lastfälle sowie die beiden Verbindungsvarianten gegenüber. Die oberen Werte stehen für die Berechnung mit gelenkigen Verbindungen. Im unteren Teil der Tabelle stehen die Werte für steife Verbindungen. Die erste Hauptspalte steht für den Lastfall Eigengewicht. In der zweiten Spalte stehen die Verformungen für den Lastfall "First" und in den Spalten drei und vier für die Lastfälle "Nord" und "Süd". Man kann feststellen, dass die Werte teils stark voneinander abweichen und bei keinem der drei Programme übereinstimmen. Lediglich für den Lastfall "Eigengewicht" können beim Vergleich zwischen RFEM und SAP 2000 für die steifen Gelenkausbildungen vergleichbare Werte festgestellt werden.

Tab. 2.1: Vergleich der Verformungen bei drei verschiedenen FEM Programmen [10]

	SAP	RFEM	ANSYS	SAP	RFEM	ANSYS	SAP	RFEM	ANSYS	SAP	RFEM	ANSYS
	Poids propre			Faite 4 x 1.0 kN			NORD 2x2.2 kN			SUD 3x2.2kN		
<b>Liaison entre les panneaux</b> <b>(ux,uy,uz,rx,ry,rz)</b> <b>( 1, 1, 1, 0, 0, 0 )</b>												
noeud 1	0.29	0.60	<b>0.57</b>	2.94	3.80	<b>2.20</b>	19.09	28.50	<b>24.16</b>	26.00	37.40	<b>32.48</b>
noeud 2	1.33	2.30	<b>1.46</b>	12.60	20.00	<b>14.28</b>	11.79	18.40	<b>14.38</b>	16.74	24.70	<b>20.03</b>
noeud 3	0.29	0.60	<b>0.33</b>	3.37	6.50	<b>3.83</b>	7.20	13.00	<b>8.93</b>	8.41	13.30	<b>11.22</b>
noeud 4	4.12	4.90	<b>5.89</b>	29.43	34.30	<b>38.99</b>	15.19	21.00	<b>20.02</b>	26.14	35.30	<b>41.60</b>
<b>(ux,uy,uz,rx,ry,rz)</b> <b>( 1, 1, 1, 1, 1, 1 )</b>												
noeud 1	0.19	0.20	<b>0.21</b>	1.19	1.50	<b>0.57</b>	7.40	8.20	<b>5.39</b>	9.59	11.20	<b>7.07</b>
noeud 2	0.66	0.80	<b>0.47</b>	5.93	7.70	<b>4.17</b>	5.44	6.20	<b>3.66</b>	5.59	6.70	<b>3.75</b>
noeud 3	0.30	0.40	<b>0.24</b>	2.40	3.20	<b>1.72</b>	4.32	5.40	<b>3.23</b>	2.45	3.10	<b>2.64</b>
noeud 4	0.92	0.90	<b>0.58</b>	4.98	6.90	<b>3.95</b>	4.44	5.40	<b>3.09</b>	5.24	6.40	<b>3.74</b>

### 2.3.1.2 Vergleich Prototyp / Berechnung

In einem weiteren Schritt sollten die berechneten Verformungen mit denen am Prototyp gemessenen verglichen werden. Dafür musste in Vorversuchen die Drehsteifigkeit der verwendeten Verbindungen bestimmt werden, um sie in die Berechnungsmodelle einsetzen zu können. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.16 dargestellt. Die Schraubenverbindungen entsprechen denen am Prototypen. Auf die Mitte wurde eine Einzellast aufgebracht und die vertikale Verformung aufgenommen.

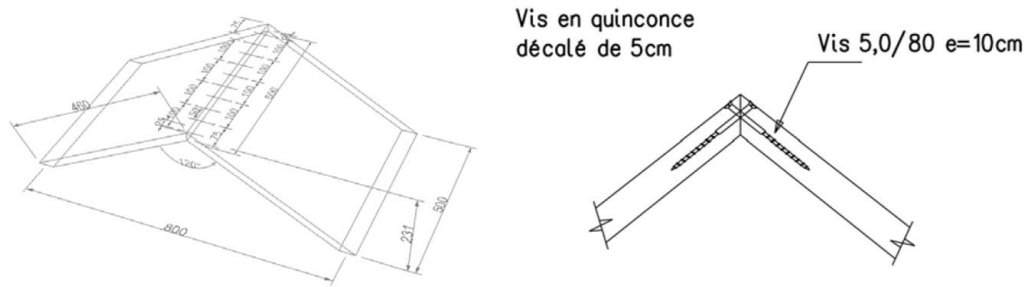


Abb. 2.16: Probeaufbau zur Ermittlung der Drehsteifigkeit der Verbindung [10]

Über die Kraft-Verformungs-Zusammenhänge konnte eine rechnerische Drehfedersteifigkeit bestimmt werden:

$$K_{\varphi,ser} = 3,953 * 10^6 \frac{Nm}{rad}$$

Die so ermittelte Steifigkeit wurde anschließend in der Berechnung mittels FE-Programm für die Verbindungen angesetzt. Da die Art und die Abstände der Schrauben bei dem Prototyp gleich waren, konnte der ermittelte Wert als Steifigkeit pro Meter angesehen werden.

Beim Vergleich zwischen den berechneten und den gemessenen Verformungen wurden die vertikalen Verschiebungen in den in Abbildung 2.17 angegebenen Punkten gemessen und den mittels RFEM berechneten Ergebnissen gegenübergestellt. Um den Prototypen dabei nicht zu beschädigen wurden sehr kleine Lasten aufgebracht.

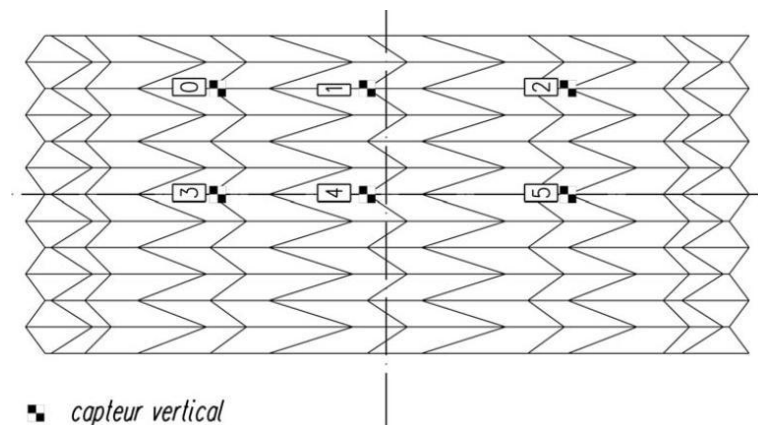


Abb. 2.17: Messpunkte für vertikale Verschiebungen[10]



Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Berechnungen mit vollkommen steifen oder vollkommen gelenkigen Anschlüssen wurden die Verbindungen in dieser Berechnung als Drehgelenke mit der experimentell ermittelten Drehfedersteifigkeit von 3.953 kNm/rad/m modelliert. Vergleicht man die Werte in der Tabelle 2.2, so stellt man fest, dass die gemessenen Verformungen am vorhandenen Prototypen viel größer sind als bei der Berechnung. Das Rechenmodell ist deutlich steifer als der Prototyp.

Cas de charge	Numérotation des capteurs						
	0	1	2	3	4	5	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
Charge Faîtes	0.2	28.5	-0.6	1.2	25.9	0.0	Essai
	-0.1	3.5	-0.2	0.1	4.0	0.1	RFEM
Charge Nord	19.9	12.5	-13.8	20.3	16.2	-13.4	Essai
	3.4	1.7	-2.6	3.7	2.8	-2.3	RFEM
Charge SUD	-12.1	5.5	14.5	-11.5	6.6	16.0	Essai
	-4.1	1.0	4.8	-3.7	0.1	5.2	RFEM

Tab. 2.2: Vergleich der Verformungen zwischen den Messungen (Essai) und den Berechnungen mit RFEM

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten zwei Probleme bei der Berechnung eines Origami-Faltwerks aus Holzwerkstoffen mit einem Finite-Elementen-Programm. Zum einen ist die Modellierung der Liniengelenke mit einer Drehfedersteifigkeit sehr aufwendig und nicht in allen FE-Programmen möglich. Ein weiteres Problem ist die Größe der verwendeten finiten Elemente. Die Berechnungen von C. PIRAZZI in [11] ergab eine Konvergenz der Verformungsberechnungen bei einer sehr kleinen Elementgröße. Für exakte Berechnungen sind also sehr kleine Elementteilungen nötig.

Im Anschluß der Verformungsuntersuchungen wurde ein Bruchtest an der Struktur durchgeführt. Dafür wurden zwei Lasten in zwei symmetrischen Punkten eingebracht. Der Bruchtest führte zu einem Versagen bei einer Last von 27 kN. Ab dieser Belastung begannen die Verbindungen wie in Abbildung 2.18 aufzureißen. Dennoch kann festgehalten werden, dass die Struktur auch mit einfachen Verschraubungen der Platten bereits eine beachtenswerte Tragfähigkeit erreicht. Die Verwendbarkeit dieser Faltmuster für die Konstruktion aus Holzwerkstoffen konnte in diesem ersten Versuch bestätigt werden.



Abb. 2.18: Aufreißen der Verbindungen beim Versagen des Faltwerks [6]

## 3 Der Entwurf einer Tennishalle

### 3.1 Allgemeine Angaben

Das Falwerk, das im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden soll, entstammt einem Entwurf für ein Tennishalle des Architekten HANI BURI, der sich in seiner Doktorarbeit mit dem Thema Origami-Faltwerke beschäftigt. Die Abbildung 3.1 zeigt eine räumliche Darstellung des betrachteten Falwerks.

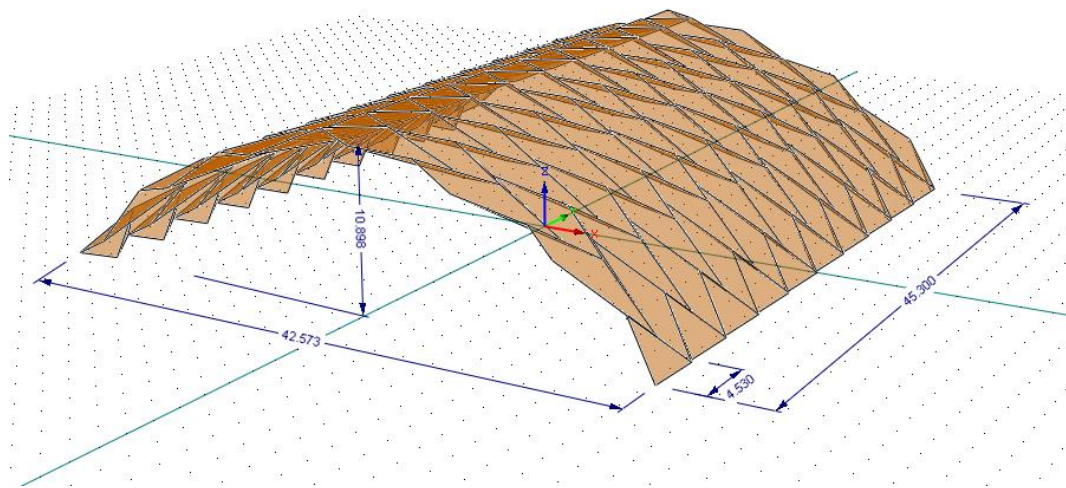


Abb. 3.1: Räumliche Darstellung des Falwerks aus Massivholzplatten

Unter einem weitgespannten Bogen soll eine Tennishalle mit zwei Spielfeldern untergebracht werden. Die Bogenform bildet sich durch sich abwechselnde Umkehrfaltungen mit unterschiedlichen Winkeln. Diese Faltung wird als Fischgrätenfaltung bezeichnet. Somit ähnelt der Aufbau dem des Prototypen am IBOIS. Ein Einzelbogen besteht aus 28 einzelnen Flächen, deren Anordnung in 13 Umkehrfaltungen sechs Bergfalten und sieben Talfalten entstehen lässt. Der Bogen hat eine Spannweite von 42,57 m bei einer Höhe von 10,90 m. Die Breite eines Einzelbogens liegt bei 4,53 m, so dass die Tennishalle bestehend aus zehn Einzelbögen auf eine Gesamtlänge von 45,30 m kommt. In der Struktur finden sich zwei verschiedene Symmetrien. Zum einen lässt sich eine Plattenreihe in der XZ-Ebene spiegeln. Gleichzeitig entsteht eine benachbarte Plattenreihe durch eine 180°-Drehung um die Z-Achse.

Der Ursprung des globalen Koordinatensystems XYZ liegt im Zentrum auf Höhe der untersten Punkte der Struktur. Die Z-Achse ist nach oben positiv definiert. Die X-Achse zeigt in die Bogen Spannrichtung und die Y-Richtung durchläuft die Bogenöffnung.

Die Auflager des Bogens werden nicht horizontal, sondern schräg im rechten Winkel zur Neigung des Bogens am Bogenfuss ausgebildet. Dadurch können die ankommenden Druckkräfte besser in

die Lager eingeleitet werden.

## 3.2 Plattendicke

Für die anschließende Modellierung muss die Dicke der Massivholzplatten festgelegt werden. Laut [12] liegt das Schlankheitsverhältnis  $l/h$  bei der Verwendung von Brettsper Holz im allgemeinen zwischen 25 und 30. Die längste Seite eines Trapezes aus der Faltstruktur hat eine ungefähre Länge von 6,00 m, die kürzeste Seite ist circa 2,00 m lang. Nimmt man den Mittelwert dieser beiden Längen erhält man durchschnittlich 4,00 m als Plattenlänge. Die Plattendicke sollte somit zwischen folgenden beiden Werten liegen:

$$\frac{l}{30} = \frac{4000mm}{30} = 133mm$$

$$\frac{l}{25} = \frac{4000mm}{25} = 160mm$$

Eine Plattendicke von 150 mm liegt zwischen diesen beiden Werten und soll somit in dem Modell verwendet werden.

## 3.3 Lastfälle

Mit der Plattendicke lassen sich nun die Belastungen auf der Struktur bestimmen. In die Berechnungen sollen dabei zwei Lastfälle einfließen, zum einen das Eigengewicht der Platten inklusive eines angenommenen Dachaufbaus sowie einer Schneelast, die für die Region in Lausanne ermittelt wurde. Die genaue Ermittlung der Lasten wird im folgenden beschrieben.

### 3.3.1 Eigengewicht

Zwar kann das Programm das Eigengewicht in einem bestimmten Lastfall mit berücksichtigen, doch lassen sich auf diese Weise spätere Lastkombinationen schwer durchführen. Daher wird für das Eigengewicht ein eigener Lastfall eingegeben. Für folgenden angenommenen Dachaufbau werden hierfür die Flächenlasten ermittelt. Für die Brettsper Holzplatte wird eine Rohdichte von 500 kg/m<sup>3</sup> angesetzt.

Tab. 3.1: charakteristische Flächenlasten des Dachaufbaus

	Dicke d [mm]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]	Flächenlast [kN/m <sup>2</sup> ]
Dachdeckung	-	-	<b>0.15</b>
Spanplatte	19	5	<b>0.10</b>
Lattung zur Hinterlüftung	27	-	-
Dichtungsband	-	-	<b>0.02</b>
Wärmedämmstoff	100	0.3	<b>0.03</b>
BSP-Platte	150	5	<b>0.75</b>
<b>Summe</b>			<b>1.05</b>

Der Dachaufbau mit den jeweiligen Dicken wurde frei gewählt und mit den Lastwerten aus den Schneider Bautabellen [13] zu den jeweiligen Flächenlasten kombiniert.

### 3.3.2 Schneelast

Die Schneelast wird anhand der Schweizer Norm SN 505 261 *Einwirkungen auf Tragwerke* von 2003 [14] ermittelt. Als Standort gilt die Stadt Lausanne.

- Standort: Lausanne
- Bezugshöhe  $h_0$  : -200 m

Laut [14] berechnet sich der charakteristische Wert der Schneelast auf Dächern, bezogen auf die überdeckte Grundrissfläche, wie folgt:

$$q_k = \mu_i \cdot C_e \cdot C_T \cdot s_k \quad (3.1)$$

Der Dachformbeiwert berücksichtigt dabei den Unterschied zwischen der Verteilung der Schneelast auf Dächern und jener auf horizontalem Gelände und ist abhängig von der Dachform und der Dachneigung. Dabei kann hier zwischen zwei unterschiedlichen Dachformen in Längs- und in Querrichtung unterschieden werden. In Querrichtung entspricht die Dachform einem Bogen, während in Längsrichtung am ehesten von einem in der Norm aufgeführten Scheddach ausgegangen werden kann. Auf eine in der Norm angegebene Berücksichtigung verschiedener Laststellungen infolge Windverfrachtung wird hier verzichtet.

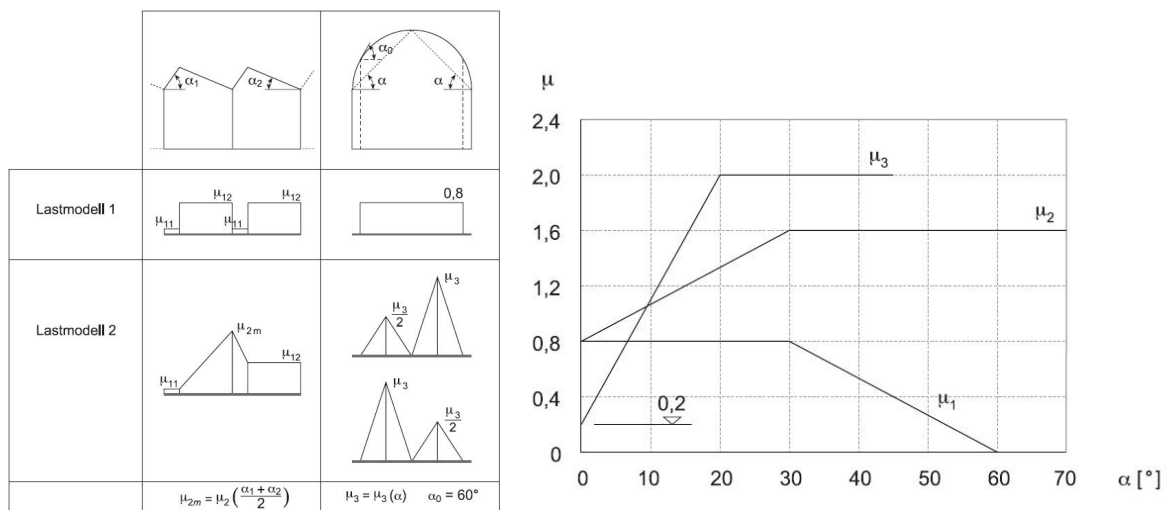


Abb. 3.2: Dachform und Dachformbeiwerte zur Ermittlung der Schneelast [14]

In Längsrichtung sind die beiden Winkel der Dachneigungen im Vergleich zu Scheddächern gleich. Über die gesamte Länge soll mit einem einzigen Formbeiwert gerechnet werden. Im ungünstigsten Fall liegt dieser laut Diagramm in Abbildung 3.2 bei 1,6. Dieser Hohe Wert ist allerdings der Annahme großer Windverwehungen und somit Lastkonzentrationen geschuldet, die hier aufgrund der Abmessungen der Faltungen so nicht zu erwarten sind. Vielmehr dürfte die Verteilung der Schneelast über dem Bogen ausschlaggebend sein. Der Neigungswinkel am Fuß des Bogens beträgt ungefähr  $45^\circ$  und ist somit kleiner als  $\alpha_0$  in Abbildung 3.2. Somit wird angenommen, dass der Schnee an den Seiten nicht abruscht und somit über die ganze Breite der Halle wirkt. Der Dachformbeiwert würde für diesen Fall den Wert 0,8 annehmen. Auf der sicheren Seite liegend soll der Formbeiwert hier mit 1,0 angenommen werden.

Die Beiwerte  $C_e$  für Wind und  $C_T$  für die Temperatur werden ebenfalls mit 1,0 angesetzt (normale Windposition). Als letzter Faktor fehlt noch der charakteristische Wert der Schneelast auf horizontalem Gelände  $s_k$ . Dieser ist abhängig von der bezogenen Höhe  $h_0$  und berechnet sich nach Gleichung 3.2.

$$s_k = \left[ 1 + \left( \frac{h_0}{350} \right)^2 \right] \cdot 0,4 \text{ kN/m}^2 \geq 0,9 \text{ kN/m}^2 \quad (3.2)$$

$$s_k = \left[ 1 + \left( \frac{-200}{350} \right)^2 \right] \cdot 0,4 \text{ kN/m}^2 = 0,53 \text{ kN/m}^2$$

Somit ergibt sich für die vorhandene anzusetzende Schneelast aus der Gleichung 3.1:

$$q_k = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,53 \text{ kN/m}^2 = 0,53 \text{ kN/m}^2$$

### 3.3.3 Lastkombinationen

Die Schnittkräfte und Verformungen sollen einzig für den Lastfall Schnee plus Eigengewicht berechnet und ausgewertet werden. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit GZT werden die für die beiden Lastfälle ermittelten Schnittgrößen mittels Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$  kombiniert.

$$E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_S \cdot S_k$$

$E_d$	- Bemessungswert der Schnittgrößen
$\gamma_G$	- Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen (Eigengewicht)
$G_k$	- charakterischer Wert der Schnittgrößen aus Eigengewicht
$\gamma_S$	- Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen (Schneelast)
$S_k$	- charakterischer Wert der Schnittgrößen aus Schneelast

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit GZG werden die Verformungsgrößen ohne Teilsicherheitsbeiwerte mit einem Kombinationsbeiwert  $\Psi_i$  von 1,0 kombiniert.

Die Kombination geschieht nach der Berechnung der Lastfälle.

## 4 Modellierung und Einstellungen

Für die Berechnungen soll das Statikprogramm für Flächentragwerke namens RFEM der Firma DLUBAL verwendet werden. Ausgangspunkt für die Modellierung ist eine aus dem Programm RHINOCEROS exportierte Datei mit dem beschriebenen Entwurf im gängigen DXF-Format. Diese Datei kann anschliessend von RFEM eingelesen und bearbeitet werden. Als erster Schritt muss die Struktur bereinigt werden, dass heisst, dass mehrfach vorhandene Punkte und Linien entfernt werden müssen. Als Ergebnis erhält man eine Struktur, die aus Punkten und Linien besteht. Anschließend müssen die weiteren Strukturdaten wie Materialeigenschaften, Bauteilabmessungen und Lagerungsbedingungen eingegeben werden. Die gewählten Eingabeparameter sowie weitere erforderliche Einstellungen werden im folgenden beschrieben.

### 4.1 Modellierung der Struktur

#### 4.1.1 Materialeigenschaften

Bevor zwischen den Begrenzungslinien die Flächen eingegeben werden können, muss diesen Flächen ein Material mit den entsprechenden Eigenschaften zugeordnet werden. Brettspertholz hat aufgrund der orthotropen Eigenschaften seines Ausgangsmaterials ebenfalls orthotrope Eigenschaften. Die Eingabe dieser Eigenschaften ist jedoch sehr aufwendig. Außerdem soll im Rahmen dieser Arbeit ein globaler Überblick über das Tragverhalten solcher komplexer Strukturen aus Origami-Faltwerken gewonnen und die Möglichkeiten zur Berechnung mit dem vorhandenen Statikprogramm ausgelotet werden. Daher soll zunächst mit einem isotropen Material gerechnet werden, um die nötigen Einstellungen in dem Programm zu finden und erste verwertbare Schnittgrößen zu erhalten. Der Einfluß der Orthogonalität auf die Rechenergebnisse wird hier ausgeklammert und sollte im weiteren Thema einer anderen Forschungsarbeit werden. Die Ergebnisse für die Berechnung mit einem isotropen Material, in dem die Materialeigenschaften richtungsunabhängig sind, werden dennoch in einem ähnlichen Bereich liegen. Anschliessende Nachweise werden wiederum an einer BSP-Platte mit unterschiedlichen Steifigkeiten und Festigkeiten in den jeweiligen Hauptrichtungen durchgeführt. Als erstes müssen also für den verwendeten isotropen Werkstoff geeignete Eigenschaften festgelegt werden. Da bei Brettspertholz die Materialeigenschaften senkrecht zur Faserrichtung der Deckplatten deutlich geringer sind, werden hier etwas geringere isotrope Materialkennwerte angenommen, als sie bei Holz üblicherweise in Faserlängsrichtung vorzufinden sind. Nadelholz hat für Holzarten im mittleren Festigkeitsbereich einen E-Modul zwischen 10000 und 12000 N/mm<sup>2</sup> in Faserrichtung. Senkrecht zur Faserrichtung liegt er lediglich noch bei einem Wert um die 380 N/mm<sup>2</sup>. Der Schubmodul G verändert sich in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel nicht, wird aber dennoch etwas geringer angenommen. Für das Modell werden den Flächen also folgende Materialkennwerte zugeordnet:

E-Modul: 8000 N/mm<sup>2</sup>

G-Modul: 500 N/mm<sup>2</sup>

Poissonzahl: 0.5

Als Plattendicke werden die in Abschnitt 3.2 ermittelten 150 mm eingegeben. Somit konnten Eigenschaften der Flächen in dem Modell bestimmt werden.

#### 4.1.2 Lagerbedingungen

Die Kanten der Platten am Auflager liegen nicht eben in der globalen XY-Ebene sondern sind so angeordnet, dass sie in einer eigenen schräg liegenden Ebene liegen, die senkrecht zur gemittelten Bogenrichtung steht. Dadurch lassen sich die ankommenden Druckkräfte besser in das Auflager einleiten. Entlang der Plattenkanten am Auflager werden gelenkige Linienlager angenommen, die frei für Rotationen um die lokalen x-, y- und z-Achse, entlang der drei Achsen jedoch unverschieblich sind. Allein durch die Faltung und dem damit entstehenden zick-zack-förmigen Verlauf entlang der Auflagerkante entsteht auf diese eine Art Einspannung entlang des Bogenfußes.

$$u_x = u_y = u_z = 0$$

$$\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z \neq 0$$

#### 4.1.3 Eingabe der Lasten

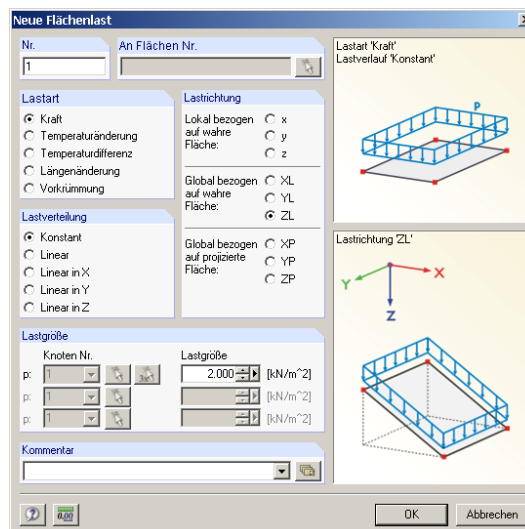


Abb. 4.1: Eingabefenster für Flächenlasten [15]

Nachdem die Flächen eingegeben wurden, können auf diese die Flächenlasten aus Abschnitt 3.3 gestellt werden. Dafür müssen die Flächen markiert und die entsprechenden Lasten in das in Abbildung 4.1 dargestellte Eingabefenster zur Eingabe von Flächenlasten eingegeben werden. Dabei ist der Unterschied zwischen dem Eigengewicht und der Schneelast zu beachten. Die Schneelast bezieht sich auf die Projektionsfläche der Struktur in der XY-Ebene, während das

Eigengewicht sich auf die Plattenfläche bezieht. Somit muss in dem Eingabefenster für die Schneelast für die Lastrichtung das Feld ZP im Bereich “Global bezogen auf projizierte Fläche” ausgewählt werden. Für das Eigengewicht muss die Lastrichtung global auf die wahre Fläche in Z-Richtung bezogen werden. Für die Lastgrößen ist ein negativer Wert einzugeben, da die globale Z-Achse in diesem Beispiel nach oben positiv definiert ist, die Kraft aber nach unten wirkt.

#### 4.1.4 Definition der Schnittgrößen

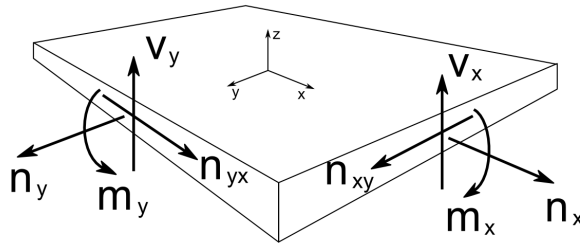


Abb. 4.2: Definition der Schnittgrößen

In Abbildung 4.2 sind die Schnittgrößen bezogen auf das lokale Koordinatensystem einer Platte dargestellt, wie sie laut RFEM definiert werden. Zu beachten ist hierbei die Bezeichnung der Momente  $m_x$  und  $m_y$ . Das Moment  $m_x$  bezeichnet nicht wie gewohnt das Moment um die x-Achse, sondern vielmehr das Moment, dass Normalspannungen  $\sigma_x$  in x-Richtung erzeugt. Entsprechend erzeugt das Moment  $m_y$  Spannungen  $\sigma_y$  in y-Richtung. Die Momente sind positiv definiert, wenn an der Plattenoberkante Zugspannungen entstehen. Die Bezeichnungen der Normalkräfte  $n_x$  und  $n_y$  und der Querkkräfte  $v_x$  und  $v_y$  erfolgt nach dem gewohnten Prinzip.

#### 4.1.5 Lokale Koordinatensysteme

##### 4.1.5.1 In den Flächen

RFEM legt in jede einzelne Fläche ein lokales Koordinatensystem. Richtungen der lokalen Koordinatensysteme werden im weiteren mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet, während die Richtungen in dem globalen Koordinatensystem mit Großbuchstaben bezeichnet werden. Die xy-Ebene entspricht dabei immer der Plattenebene, während die z-Achse orthogonal auf der jeweiligen Platte steht. Die Ausrichtung der x- und der y-Achse ist dabei mehr oder weniger zufällig. Für eine spätere Auswertung der Grundschnittgrößen ist es jedoch notwendig, die Richtung der beiden Achsen festzulegen und zu vereinheitlichen. Dies kann bei einer komplexen Struktur wie einem Origami-Faltwerk, dessen Platten in vielfältiger Weise angeordnet werden können, durchaus kompliziert werden. Im vorliegenden Fall jedoch sind sämtliche Kanten, die in der Bogenebene liegen, parallel zueinander ausgerichtet. Die lokalen x-Achsen wurden daher so definiert, dass sie in jeder Fläche parallel zu diesen Kanten verlaufen. Die y-Achsen liegen dementsprechend senkrecht dazu in der Plattenebene und die z-Achse steht senkrecht auf der betreffenden Fläche. Würde man also die lokale x-Achse einer Fläche auf die globale XY-Ebene projizieren, würde sie für jede Fläche in Richtung der globalen X-Achse zeigen. Die Abbildung 4.3



verdeutlicht das in einem bestimmten Bereich des Faltnetzes. Links ist die Ausrichtung der lokalen Koordinatensysteme vor der Vereinheitlichung zu sehen. Die Achsenorientierung ist mehr oder weniger zufällig. Im rechten Bild sieht man schließlich das Ergebnis der vorher beschriebenen Neudefinition der Achsenrichtungen.

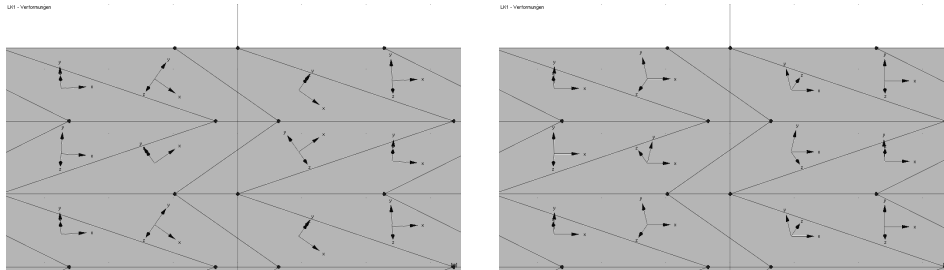


Abb. 4.3: Ausrichtung der lokalen Achsensysteme ohne Vorgabe (links) und nach Neufestlegung (rechts)

Der Richtung der lokalen Koordinatensysteme soll für die späteren Nachweise der Schnittgrößen auch den Hauptrichtungen der verwendeten BSP-Platten entsprechen. Die x-Achse entspricht der Faserrichtung der Deckschichten. Die y-Achse ist gleichbedeutend mit der Faserrichtung der Querlage.

#### 4.1.5.2 An den Anschlußkanten

Neben den Schnittgrößen in den Flächen müssen auch die Schnittgrößen an den Plattenkanten, das heißt die zu übertragenden Schnittgrößen in den Verbindungen, ausgewertet werden. In RFEM kann der Schnittgrößenverlauf in bestimmten Schnitten angezeigt werden. Allerdings beziehen sich die so angezeigten Schnittgrößen auf die lokalen Achsensysteme der beiden angrenzenden Flächen und nicht auf ein Achsensystem, das sich entlang des Schnittes orientiert. Für die parallelen Kanten in der Bogenebene mag das mit den oben definierten Achsensystemen funktionieren, doch werden die Werte unbrauchbar, sobald man sich die Schnittkräfte in einer der Verbindungen anzeigen lassen will, die in einem bestimmten Winkel zu der Bogenebene und somit zu den festgelegten lokalen Koordinatensystemen verläuft. Die auf die lokalen Achsen bezogenen Schnittkräfte repräsentieren somit nicht die Schnittkräfte bezogen auf die Längsachse der Verbindung. Daraus folgt, dass für die Betrachtung der Schnittkräfte in diesen Anschlüssen die angrenzenden lokalen Achsensysteme nach der Verbindungsachse neu ausgerichtet werden müssen. Die Neuorientierung der Koordinatensysteme für die Betrachtung der Linienverbindungen ist einmal beispielhaft in der Abbildung 4.4 dargestellt.

Da dieses Vorgehen in direktem Zusammenhang mit den Anschlußberechnungen der Linienverbindungen steht, wird das entsprechende Verfahren am Anfang des Kapitels 7 im Abschnitt 7.1.1 noch einmal ausführlich erläutert.

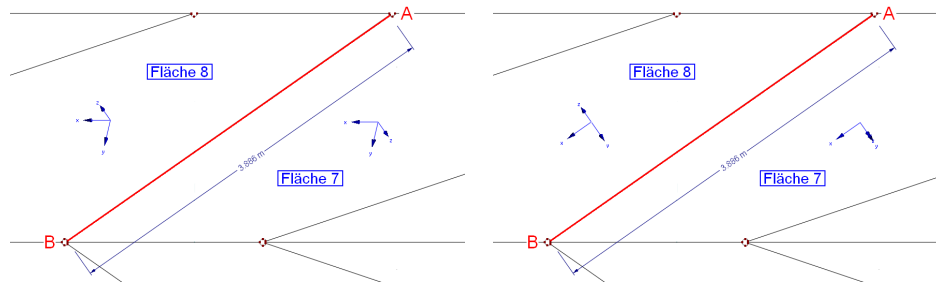


Abb. 4.4: Ursprüngliche Ausrichtung der lokalen Koordinatensysteme (links) und Neuorientierung entlang der Verbindung (rechts)

## 4.2 Ermittlung der erforderlichen Einstellungen und Voruntersuchungen

Mit den beschriebenen Strukturdaten ist ein Modell vorhanden, mit dem theoretisch die Berechnungen durchgeführt werden könnten. Vorher sind allerdings noch einige Einstellungen zu treffen, die einen wichtigen Einfluß auf die Ergebnisse haben. So muss als allererstes eine Einteilung der Struktur in finite Elemente definiert werden. Zum anderen müssen die Bedingungen an den Verbindungen zwischen den Platten für die beiden betrachteten Fälle bestimmt werden. Zum einen müssen die Einstellungen so gewählt werden, dass ein Gelenk um die Verbindungslängsachse entsteht. Für den zweiten Fall brauchen wir biegesteife Anschlüsse an den Platten.

Bevor also im Sinne dieser Arbeit aussagefähige Ergebnisse ermittelt und betrachtet werden können, sind einige spezielle Voruntersuchungen notwendig, mit deren Hilfe bestimmte auftretende Probleme der Berechnung gelöst werden sollen. Diese Voruntersuchungen werden jedoch nicht am gesamten Modell durchgeführt, da dies in Anbetracht des Zeit- und Rechenaufwands nicht zweckmässig wäre. Vielmehr wurde die Struktur für die Proberechnungen auf zwei Einzelbögen verkleinert, die sich aus insgesamt 56 Einzelstücken zusammensetzen und somit ein Modell wie in Abbildung 4.5 bilden. Zum einen wird dadurch die Rechenzeit als auch die Zeit für eventuelle Modifikationen deutlich verkürzt und zum anderen wird die Summe der Ergebnisse dabei überschaubarer. Auch die Lastfälle wurden für eine einfachere Auswertung zusammengelegt. Es gibt nur einen Lastfall für die Schneelast. Das Eigengewicht wird in diesem Lastfall durch das Programm selber berücksichtigt und muss somit nicht separat eingegeben werden. Die hier verwendete Schneelast beträgt  $1,00 \text{ kN/m}^2$ . Somit entfällt eine spätere Kombination und die Werte können direkt ausgewertet werden. Dies erscheint zweckmässig, da hier nur der Einfluß diverser Einstellungen im Programm auf die Berechnung ausgewertet werden soll, und nicht die Rechenergebnisse selber von entscheidender Bedeutung sind. Die so ermittelten Ergebnisse stehen somit zwar in keinem direkten Zusammenhang zu den Berechnungen an der gesamten Konstruktion der Tennishalle, liefern aber dennoch qualitative Aussagen über das Tragverhalten der Struktur und die Art der Berechnung durch das FE-Programm. Die Art der Plattenanordnung bleibt bei der Reduzierung des Modells auf zwei Bögen erhalten. Somit dürfte die Tragwirkung der Faltstruktur der der Tennishalle gleichen. Die Erkenntnisse dieser Voruntersuchungen werden anschließend auf die Tennishalle übertragen und die Berechnungen durchgeführt.

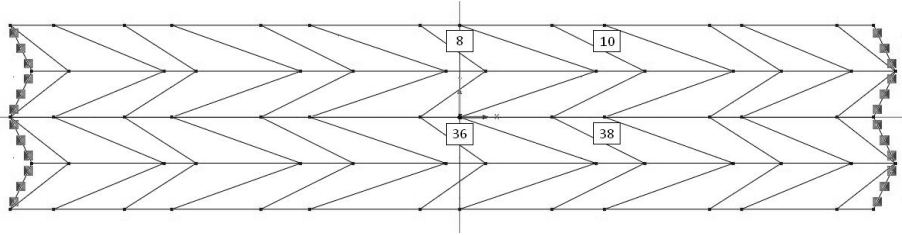


Abb. 4.5: Verkleinerte Struktur für Voruntersuchungen bestehend aus zwei Einzelbögen

In den folgenden Abschnitten werden einige Probleme beschrieben, die bei der Berechnung der Struktur aufgetreten sind und die durch Vergleichsrechnungen an dem oben beschriebenen verkleinerten Modell zu lösen versucht wurden.

#### 4.2.1 Liniengelenke

Die Linien zwischen den Flächen stellen bisher lediglich geometrische Begrenzungen der Flächen dar. Im Rahmen dieser Arbeit sollen jedoch auch besonders die Bedingungen in den Verbindungen zwischen den Platten und das Verhalten der Struktur in Abhängigkeit von der Ausbildung der Verbindungen untersucht werden. Um die beiden zu betrachtenden Fälle der steifen und der gelenkigen Verbindungen untersuchen zu können, müssen also entlang der Linien sogenannte Liniengelenke definiert werden.

Laut [15] beschreibt ein Liniengelenk die Eigenschaft einer Fläche und nicht, wie man annehmen könnte, die Eigenschaft einer Linie. RFEM berücksichtigt Liniengelenke in der Form, dass es die Steifigkeiten der Elemente, die entlang der Linie angeordnet sind, entsprechend anpasst. Demzufolge muss ein Liniengelenk auch einer Fläche zugeordnet werden. Dabei ist zu beachten, dass nicht etwa ein Liniengelenk auf beiden Seiten der Verbindungen anzuordnen ist, sondern jeweils nur auf einer Seite. Auf welcher Seite der Verbindungen das Liniengelenk liegt, darauf wurde vorerst nicht geachtet, jedoch wird versucht eine symetrische Verteilung der Liniengelenke zu erhalten.

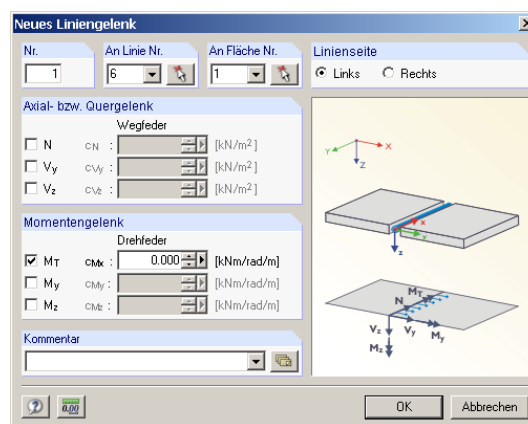


Abb. 4.6: Eingabefenster für die Festlegung von Liniengelenken [15]

Das Eingabefenster für die Definition von Liniengelenken ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Verschiebungen zwischen zwei Platten werden sowohl für gelenkige als auch für steife Verbindungen

blockiert. Für die Berechnung mit steifen Verbindungen werden in dem Eingabefenster zusätzlich alle verfügbaren Gelenke blockiert, das heißt, dass keines der Kontrollkästchen ausgewählt wird. Bei der gelenkigen Ausführung der Verbindungen soll eine Rotation um die Verbindungslängsachse ermöglicht werden. Somit muss in dem Eingabefenster das Drehmoment um die Längsachse  $M_T$  freigestellt werden. Das Feld für die Drehfeder bleibt leer. In dieser Form wurden zunächst sämtliche Verbindungen zwischen den Flächen modelliert.

#### 4.2.2 Wahl eines geeigneten Netzes aus finiten Elementen

Bei der Verwendung von FE-Programmen zur Berechnung komplizierter Tragwerke ist es notwendig, eine geeignete Verfeinerung des Netzes aus finiten Elementen zu finden. Allgemein läßt sich sagen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse zunimmt, je kleiner die einzelnen Elemente sind. Es wird eine Einteilung benötigt, die zwar einerseits ausreichend genaue Ergebnisse liefert, andererseits jedoch den dafür benötigten Rechenaufwand in Grenzen hält. Vor allem in Bereichen von Diskontinuitäten hat die Berechnung mit finiten Elementen eine hohe Fehleranfälligkeit und erfordert somit eine ausreichende Verfeinerung in diesen Bereichen. In dem vorhandenen Faltwerk finden sich zahlreiche solcher Diskontinuitäten sowohl in Form der Knotenpunkte, in denen vier Platten aus vier verschiedenen Richtungen aufeinandertreffen, als auch in den Linienverbindungen zwischen den Platten. Im Vorfeld wurden daher an dem verkleinerten Modell Berechnungen mit verschiedenen Verfeinerungen des FE-Netzes durchgeführt und miteinander verglichen. Ziel war es, Parameter für die automatische Netzgenerierung zu finden, die bei einer vertretbaren Rechenleistung zu möglichst genauen Ergebnissen führen. Bei einer groben FE-Einteilung mit einer Elementlänge von 0,40 m beginnend wurden die Verformungen der vier in Abbildung 4.5 gekennzeichneten Knoten festgehalten und für immer feiner werdende Einstellungen miteinander verglichen. Die Knoten 8 und 36 liegen im Firstbereich. Die Knoten 10 und 38 liegen in der zweiten Umkehrfaltung unterhalb des Firsts. Hier wurden bei ersten vereinfachten Berechnungen die grössten Verformungen registriert. Unter der Annahme, dass die Verformungswerte sich bei zunehmender Verfeinerung einem bestimmten Wert annähern, wurde daraufhin eine Einstellung gewählt, für die die Verformungen im Bereich dieser Konvergenzwerte liegen und somit eine ausreichend feine Einteilung für die Berechnung liefern. Die Erkenntnisse aus diesem Vergleich wurden dann auf die gesamte Struktur angewendet und eine Berechnung mit der gewählten Netzverdichtung durchgeführt.

RFEM bietet für die Netzverfeinerung verschiedene Möglichkeiten an. Die einfachste Einteilung der Struktur in finite Elemente kann vorgenommen werden, indem dem Programm eine allgemeine anzustrebende Größe der Elemente vorgegeben wird. Eine vorhergegangene Studie von J. NATTERER und C. PIRAZZI [10] ergab als optimale Größe für die finiten Elemente eine Abmessung von 5 cm. Mit dieser Einteilung wird jedoch die Berechnung zu aufwendig und der Rechner stößt an die Grenzen seiner Rechenkapazitäten. Eine gröbere Einteilung hat jedoch zur Folge, dass die Bereiche an den kritischen Stellen, wie zum Beispiel den Knotenpunkten, in denen sich die vier verschiedenen BSP-Platten treffen, oder die Bereiche der Linienverbindungen nicht ausreichend genau verfeinert werden. Bei entsprechend feiner Einteilung würden in den restlichen Bereichen, in denen mit größeren Elementen gerechnet werden könnte, die Elemente im Hinblick auf den Rechenaufwand und die Dateigröße wiederum zu klein gewählt werden.

Zusätzlich kommen daher differenziertere Verfeinerungen des FE-Netzes mit Bezug auf kritische Bereiche der Struktur in betracht. Unter dem Menüpunkt “FE-Netzverdichtungen” kann zwischen vier Arten der Netzverfeinerung gewählt werden:

- Anwendung auf Knoten (kreisförmig oder rechteckig)
- Anwendung auf Linien (durch FE-Länge oder durch Teilung in n Bereiche)
- Anwendung auf Flächen
- Anwendung auf Volumen

Bei Verwendung dieser Funktion werden die finiten Elemente im Bereich der aufgeführten Strukturbestandteile verkleinert. Außerhalb dieser Bereiche wird die allgemeine FE-Länge verwendet, die ebenfalls festgelegt werden kann.

Besonderes Augenmerk soll hier auf den Einfluß der Netzdichte im Bereich der Verbindungskanten und der Knotenpunkte gelegt werden. Eine Anwendung dieser Funktion auf die Flächen erscheint aus oben genannten Gründen nicht sinnvoll. Im folgenden werden daher die ersten beiden Varianten der Knoten- und der Linienverdichtung betrachtet.

#### 4.2.2.1 Anwendung auf Knoten

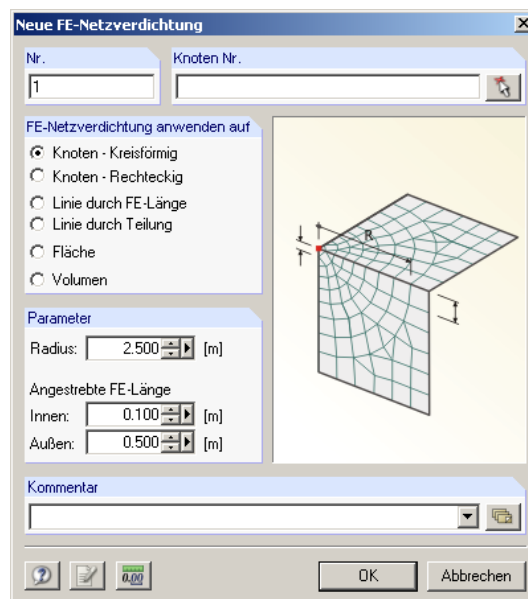


Abb. 4.7: Eingabefenster für FE-Netzverdichtung an den Knoten [15]

Die Abbildung 4.7 zeigt das Eingabefenster für die Netzverdichtung, angewendet auf die Knoten. Die zu wählenden Parameter unterscheiden sich, je nachdem, ob man eine Verdichtung auf einen kreisförmigen oder auf einen rechteckigen Bereich wählt. Bei der kreisförmigen Verdichtung müssen der *Radius*, das heißt die Größe des verdichteten Bereiches um den Knoten, die *anzustrebende FE-Länge innen*, sowie die *anzustrebende FE-Länge außen* angegeben werden. Für die Verdichtung in Form eines Rechtecks um den Knoten wird die *Seitenlänge*, wie beim Radius der Einflussbereich der Verdichtung, sowie die *angestrebte FE-Länge* am Knoten benötigt. Auf Grund der allgemeinen Abmessungen der Trapeze wurde für den *Radius* als auch für die *Seitenlänge* die

Größe 2,00 m gewählt. Allerdings ergab die Variante der rechteckförmigen Verdichtung um die Knoten ungünstige geometrische Formen der finiten Elemente, wie die Abbildung 4.8 zeigt. Dort ist das Ergebnis der Netzverdichtung, angewandt auf ein Trapez der Konstruktion, einmal für die kreisförmige und einmal für die rechteckförmige Variante mit einer inneren anzustrebenden FE-Länge von 0,03 m dargestellt. Bei der zweiten Variante werden Dreiecke mit sehr spitzen Winkeln generiert, eine Form, die bei der FE-Berechnung zu falschen Ergebnissen führt. Desweiteren ist die Verdichtung sehr unregelmäßig im Vergleich zur kreisförmigen Variante. Die Verdichtung in einem rechteckigen Bereich scheint für die Bauteilgeometrie der Trapeze also nicht geeignet. Daher wird im folgenden auf eine Anwendung dieser Methode verzichtet und lediglich die kreisförmige Netzverdichtung genauer betrachtet.

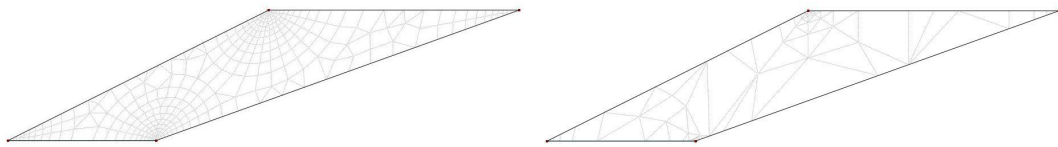


Abb. 4.8: FE-Netzverdichtung kreisförmig (links) und auf rechteckigen Bereich (rechts)

Während der im folgenden beschriebenen Vorgehensweise wurde als einzige Einflussgröße der *Radius* von 2,0 m beibehalten. Als Ausgangswerte für die FE-Längen wurden anfangs innen wie außen 0,40 m angesetzt und die Verformungen in den vier betrachteten Punkten registriert. Von diesen Ausgangswerten ausgehend wurden nun die Verformungen bei zunehmender Reduzierung der Elementabmessungen an den Knoten unter Beibehaltung der äußeren Elementabmessungen für gelenkige Linienverbindungen berechnet. Die Verkleinerungsschritte sind 0,20 m, 0,10 m, 0,05 m, 0,04 m, 0,03 m und 0,02 m. Eine erste Auswertung dieser Berechnungen zeigt die Abbildung 4.9. Dort werden in drei Diagrammen die drei globalen Verformungen in X-, Y- und Z-Richtung für die fortlaufende Verfeinerung an den Knoten dargestellt. Die vier unterschiedlichen Verläufe in einem Diagramm repräsentieren das Verformungsverhalten der vier verschiedenen Punkte aus Abbildung 4.5. Bei einer inneren Elementlänge von 5 cm lässt sich in allen drei Diagrammen ein Knick im Verlauf feststellen. Für die Knoten im Firstbereich lässt sich ab dieser Einstellung feststellen, dass sich die Verformungen nicht mehr ausschlaggebend verändern. Bei den beiden anderen Knoten im Bereich der stärksten Verformungen bleibt ein schwacher Anstieg weiterhin registrierbar.

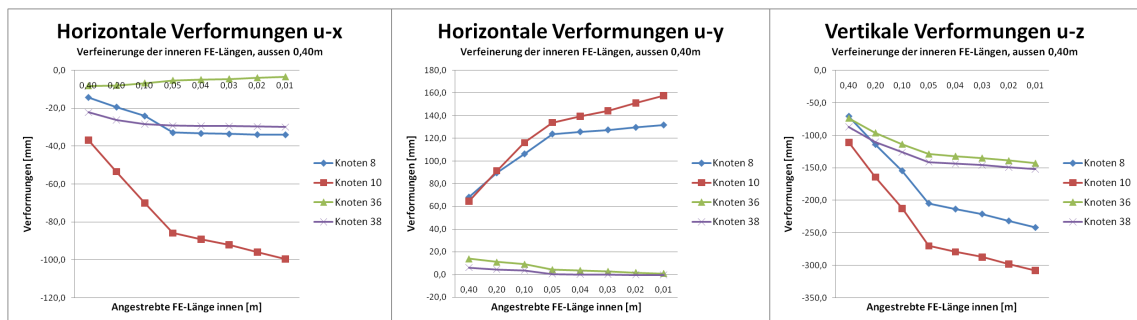


Abb. 4.9: Verlauf der Verformungen mit zunehmender Dichte bei kreisförmiger Verdichtung an den Knoten und gelenkigen Verbindungen

Im zweiten Schritt wurde untersucht, wie sich bei einer Verkleinerung der Außenabmessungen

und gleichzeitiger Beibehaltung der inneren Elementabmessungen die Werte verändern, um zu sehen, welchen Einfluss die äußeren Elementabmessungen auf die Ergebnisse haben. Zwar konvergieren die Verformungen ab einer Elementabmessung von 5 cm, aufgrund einer höheren Genauigkeit und einer vertretbaren Berechnungszeit wurde jedoch eine innere FE-Länge von 0,03 m beibehalten und die Abmessungen am Rand des Einflußbereichs auf 0,30 m und 0,20 m reduziert. Zusammen mit den äußeren FE-Längen wurde auch die allgemeine FE-Länge für das Netz entsprechend angepasst. Es ließ sich feststellen, dass hier keine signifikante Veränderung der Verformungsgrößen stattfand. In Abbildung 4.10 wird das noch einmal deutlich.

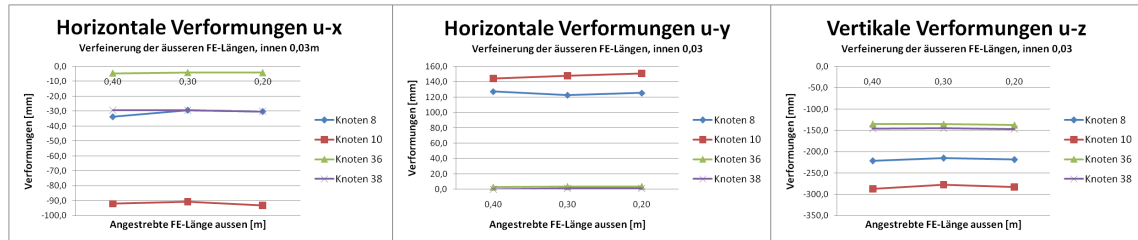


Abb. 4.10: Verformungen bei 0,03 m Innenabmessungen und Verkleinerung der Elementgröße außen für gelenkige Verbindungen

Dies führt zu der Erkenntnis, dass die äußeren Elemente durchaus mit einer Elementgröße von 0.40 m generiert werden könnten und eine günstige Netzverdichtung mit den folgenden Parametern bei kreisförmiger Verdichtung erzielt wird:

- Radius 2,00 m
- anzustrebende Elementlänge außen 0,40 m
- anzustrebende Elementlänge innen 0,03 m

Die bisher genannten Erkenntnisse gelten zunächst für die Verformungen bei gelenkigen Verbindungen. Bei der Berechnung mit steifen Verbindungen ergaben sich sehr geringe Verformungsveränderungen mit zunehmender Netzdichte, wie Abbildung 4.11 zeigt. Dies ist durch die Vorgehensweise des Programms bei der Simulation von Liniengelenken zu erklären. RFEM berücksichtigt die Steifigkeiten von Liniengelenken, in dem es die Steifigkeiten der angrenzenden finiten Elemente anpasst. Hier wird bei der Berechnung mit steifen Verbindungen die Steifigkeit der Elemente nicht verändert. Somit hat auch die Elementgröße an der Linienv Verbindung keinen Einfluß auf die Verformungsberechnungen, da die angrenzenden Elemente stets die Steifigkeitswerte der gesamten Fläche haben.

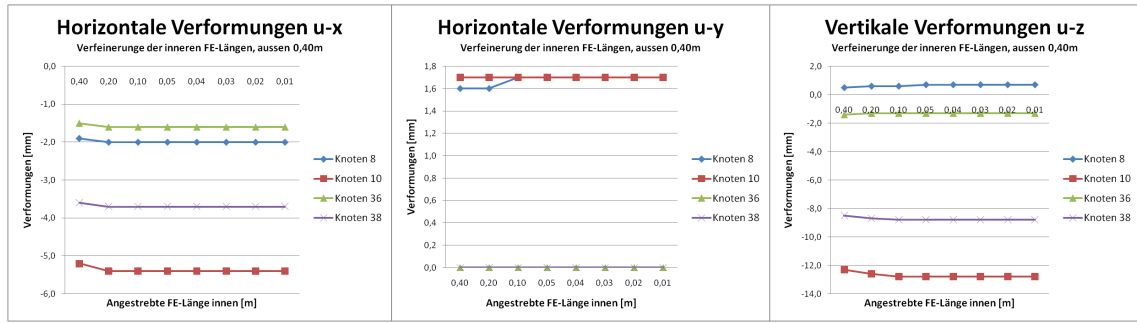


Abb. 4.11: Verlauf der Verformungen mit zunehmender Dichte bei kreisförmiger Verdichtung an den Knoten und steifen Verbindungen

Interessant ist es im folgenden zu betrachten, wie sich die Verformungen bei der zweiten Möglichkeit, der Netzverdichtung entlang der Liniengelenke, verhalten. Dort werden die Elemente zu den Linien hin immer kleiner, haben also die gleiche Größe entlang der Liniengelenke.

#### 4.2.2.2 Anwendung auf die Linien

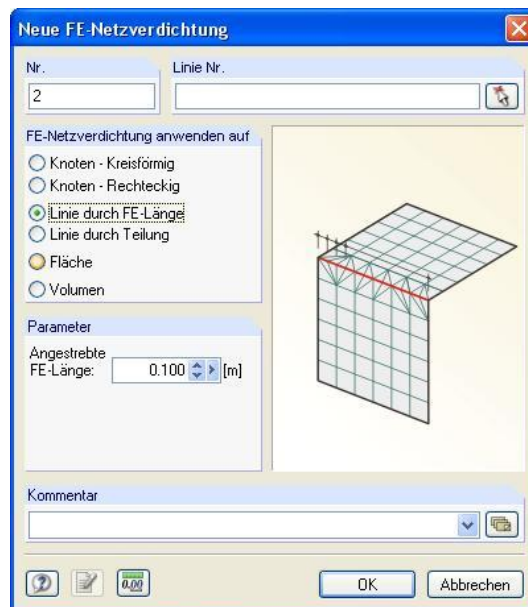


Abb. 4.12: Eingabefenster für FE-Netzverdichtung an den Linien

Das Vorgehen bei der Ermittlung einer günstigen Einstellung für die Netzverdichtung an den Linien erfolgte nach dem gleichen Schema wie bei der vorher beschriebenen kreisförmigen Verdichtung um die Knoten mit den Einstellungen für eine gelenkige Verbindung. Abbildung 4.12 zeigt das Eingabefenster für Netzverdichtung entlang der Linien. Es kann zwischen einer Verdichtung durch Einteilung der Linien in n Bereiche und einer Verdichtung durch Angabe einer anzustrebenden FE-Länge entlang der Linien gewählt werden. Um in einem vergleichbaren Rahmen mit der vorangegangenen Untersuchung zu bleiben, wurde hier die zweite Variante der Linienteilung verwendet. Ausgehend von einer groben FE-Länge von 0,40 m wurde dieser Parameter in denselben Schritten verkleinert wie bei der Knotenverdichtung. Die Einteilung eines so generierten Netzes



aus finiten Elementen ist in Abbildung 4.13 zu sehen. Als Pendant zu der bei der Verdichtung um die Knoten geforderten äußeren FE-Länge kann hier die Einstellung für die allgemeine FE-Länge angesehen werden. Die Abbildung macht auch deutlich, dass die allgemeine FE-Länge einen Einfluss auf die Geometrie der generierten Elemente hat. Wird sie zu groß gewählt entstehen ungünstige Elementgeometrien. Anfangs wurde wie bei der Knotenverdichtung eine allgemeine FE-Länge von 0,40 m beibehalten.

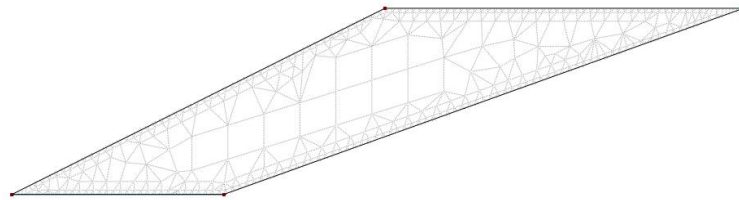


Abb. 4.13: FE-Netzverdichtung entlang der Linien mit 0,05 m FE-Länge

Mit zunehmender Dichte entlang der Linien verringern sich die Verformungsunterschiede. Ab einer Elementlänge von fünf Zentimetern sind die Veränderungen nur noch sehr klein. Die Verformungswerte der Knoten liegen im selben Bereich wie bei der Knotenverdichtung. Dies zeigt ein Vergleich der Verformungslinien in Abbildung 4.9 und Abbildung 4.14.

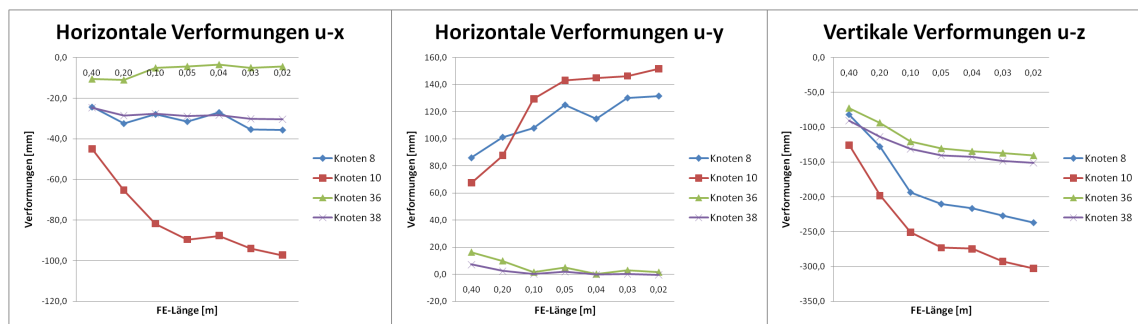


Abb. 4.14: Verlauf der Verformungen mit zunehmender Verdichtung entlang der Linien bei gelenkigen Verbindungen

Wie zu erwarten hat die Verkleinerung der Elemente bei steifen Verbindungen ebenfalls keine großen Auswirkungen auf die Verformungen in Abbildung 4.15. Auch hier liegen die Verformungen im selben Bereich wie bei der Netzverdichtung an den Knoten in Abbildung 4.11.

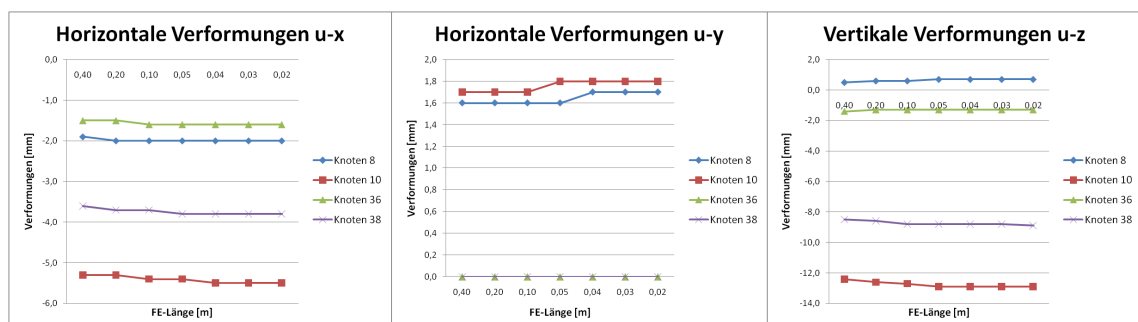


Abb. 4.15: Verlauf der Verformungen mit zunehmender Verdichtung entlang der Linien bei steifen Verbindungen

Abschließend soll noch einmal geschaut werden, wie sich die Verformungen verhalten, wenn die allgemeine Elementgröße unter Beibehaltung einer FE-Länge von 3 cm entlang der Linien verkleinert wird. Das Ergebnis zeigen die Diagramme in Abbildung 4.16. Hier ist derselbe Effekt zu sehen wie bei dem äquivalenten Verfahren für eine kreisförmige Verdichtung um die Knoten. Auch hier hat die Verkleinerung der allgemeinen Elementgröße keinen entscheidenden Einfluß auf die Verformungsergebnisse.

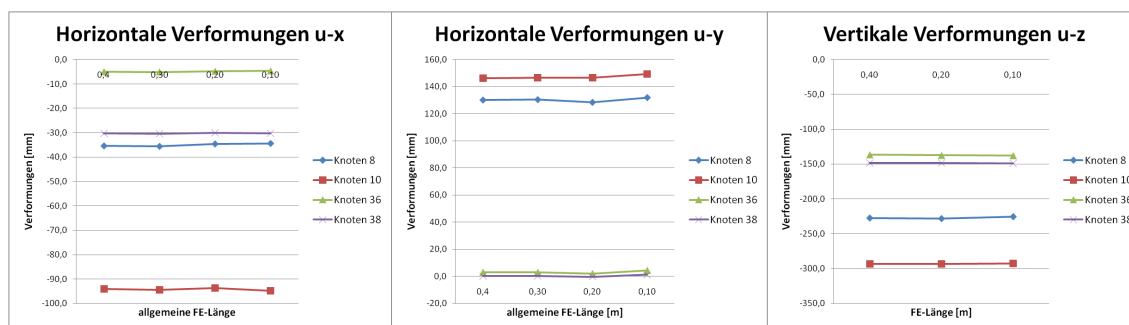


Abb. 4.16: Verformungen bei 0,03 m Elementabmessungen entlang der Linien und Verkleinerung der allgemeinen Elementgröße

Betrachtet man den notwendigen Rechenaufwand bei den beiden Verfahren, so stellt man fest, dass die FE-Netzverdichtung entlang der Linien eine deutlich größere Rechenzeit erfordert. Während bei der kreisförmigen Verdichtung Abmessungen für die finiten Elemente von 0,02 m noch relativ schnell generiert werden konnten, führt diese Größenordnung bei der Verdichtung entlang der Linien bereits zu sehr langen Rechenzeiten. Es ist daher anzunehmen, dass die Rechenleistung bei der FE-Netzgenerierung, angewendet auf die gesamte zu berechnende Struktur, auch bei dem im ersten Verfahren gewählten FE-Längen von 0,03 m sehr groß wird. Da die Verformungen für den Parameter 0,03 m an den Problempunkten jedoch sehr nah beieinander liegen, kann davon ausgegangen werden, dass das Verfahren, mit der RFEM Liniengelenke simuliert, auch bei der kreisförmigen FE-Netzverdichtung um die Knoten ausreichend berücksichtigt wird. Dies führte zu der Entscheidung, die ersten anschließenden Berechnungen mit der im ersten Verfahren gewählten Einstellung durchzuführen.

## 4.3 Weitere Problemstellungen

### 4.3.1 Spannungsspitzen an den Knotenpunkten

Die im vorigen Abschnitt bestimmten Parameter wurden anschließend auf das Modell der Tennishalle übertragen und eine Berechnung durchgeführt. Bei einem ersten Vergleich der Spannungen fiel dabei auf, dass eine extrem starke Konzentration der Hauptspannungen in den Bereichen der Knoten bei gelenkigen Anschlüssen der Kanten, vor allem im Firstbereich, auftritt. Die Hauptspannungen definieren sich laut [15] als extremale Spannungen in jedem Flächenelement. Die Hauptachse 1 bildet dabei den Maximalwert, während die Hauptachse 2 orthogonal zu dieser steht und den dazugehörigen Minimalwert repräsentiert. Die Hauptspannung  $\sigma_{1+}$  nahm bei gelenkigen Verbindungen extremale Werte von bis zu 270 N/mm<sup>2</sup> an. Betrachtet man nun einmal die graphische Darstellung der Hauptspannung in einem solchen Knotenpunkt, wie in der linken

Hälfte der Abbildung 4.17 geschehen, genauer, so stellt man fest, dass diese Singularitäten vor allem bei den stumpfen Ecken der Platten auftreten. Schon in Abschnitt 4.2.2 wurde auf die Probleme bei der FE-Berechnung mit auftretenden Singularitäten hingewiesen. Diese extrem hohen Spannungsspitzen beeinflussen eine spätere Auswertung der Beanspruchungen in den Platten und müssen daher entschärft werden.

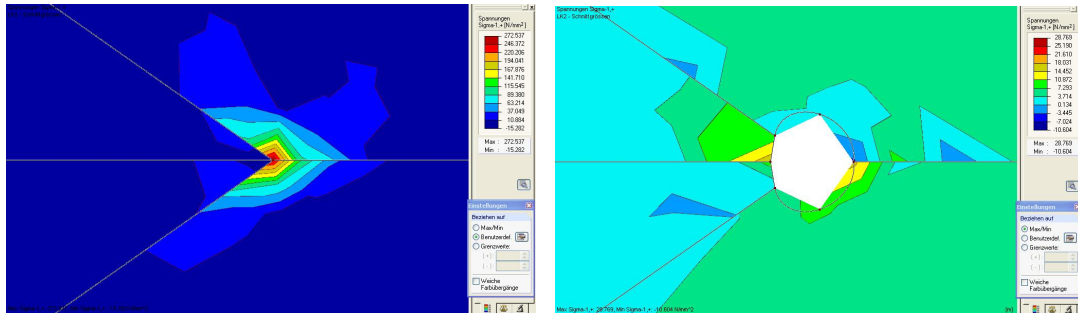


Abb. 4.17: Spannungskonzentrationen an einem Knotenpunkt im First ohne (links) und mit Spannungsöffnungen (rechts)

Ein Mittel zur Entschärfung solcher Störstellen ist die Anordnung kleiner Öffnungen in den Bereichen der Singularitäten. Dadurch lassen sich die Spannungen an diesen Stellen deutlich reduzieren. Als günstige Maßnahme erwiesen sich nach einigen Vergleichsrechnungen an der verkleinerten Struktur kreisrunde Öffnungen mit einem Radius von 3 cm um die Knotenpunkte. Der Radius entspricht der gewählten Elementlänge an den Knoten. Wie man in der rechten Hälfte der Abbildung 4.17 erkennen kann, lassen sich dadurch die Spannungsspitzen erheblich reduzieren. Deutlicher zu sehen ist dieser Effekt noch einmal in den Diagrammen in Abbildung 4.18. Dort sind die verschiedenen Hauptspannungen in unterschiedlichen Bereichen der Tennishalle dargestellt. Auf dem linken Diagramm sieht man die Hauptspannungen in dem ursprünglichen Modell. Auf der rechten Seite stehen die Hauptspannungen nach der Anordnung der beschriebenen Knotenöffnungen. Der erste Wert ist dabei jeweils der äußersten Plattenreihe im Bogen am ungestützten Rand entnommen. Der zweite Wert entstammt der anschließenden gespiegelten Plattenreihe. Die beiden anschließenden Werte entstammen Plattenreihe drei und vier. Zum Vergleich werden noch zwei Plattenreihen aus dem Bereich in der Mitte angefügt. Eine Diagrammkurve repräsentiert den Verlauf eines bestimmten Hauptspannungstyps vom Randbereich in Richtung Mitte. Die gestrichelten Linien entsprechen den Werten für gelenkige und die durchgängigen Linien den Werten für steife Linienverbindungen. Wie man sehen kann liegen in beiden Fällen die Werte in dem rechten Diagramm deutlich unter denen aus dem linken Diagramm für die Struktur ohne Knotenöffnungen. Während ohne Öffnungen im Randbereich ein Höchstwert von circa  $90 \text{ N/mm}^2$  zu verzeichnen ist, kann der Anstieg der Spannungen durch die angeordneten Öffnungen auf rund  $17 \text{ N/mm}^2$  reduziert werden.

Abbildung 4.17 zeigt auch, dass die Konzentration der Spannungen an diesen Stellen nicht vollständig verschwindet. Dennoch kann festgehalten werden, dass durch diese einfache Maßnahme die lokalen Spannungsspitzen auf fast 20 % der ursprünglichen Werte reduziert werden können. Auch wenn diese Modifikation aufwendig erscheint, kann der Zeitaufwand durch die Vervielfältigungs- und Spiegelfunktionen von RFEM in Grenzen gehalten werden, indem die Veränderungen automatisch auf die anderen Bereiche übertragen werden können.

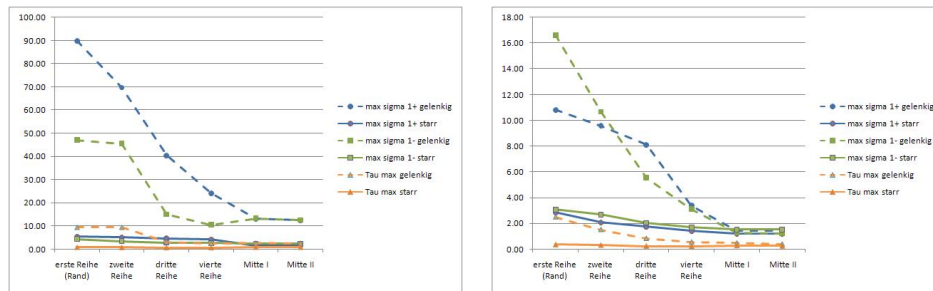


Abb. 4.18: Hauptspannungen ohne Spannungsöffnungen (links) und mit Spannungsöffnungen (rechts)

#### ANMERKUNG:

Das Problem der extremen Anstiege der Schnittgrößen und Spannungen ist sehr komplex und nicht so einfach zu lösen. Die Lösung dieser Problematik erfordert eine genauere und detailliertere Betrachtung der Funktionsweise des Programms und der Verwendung der finiten Elemente. Dies soll jedoch nicht Teil dieser Arbeit sondern könnte vielmehr Inhalt einer weiteren separaten Forschungsarbeit sein. Hier soll mit dem Hintergrundwissen, dass diese Probleme in den Knotenbereichen existieren, fortgefahren werden. Mit den hier getroffenen Veränderungen konnten die negativen Effekte in erheblichen Maße reduziert werden.

### 4.3.2 Momente in gelenkigen Verbindungen

Bei den Betrachtungen der Schnittgrößen in den Linienverbindungen zwischen den Platten traten bei der Berechnung mit gelenkigen Verbindungen trotz der in Abschnitt 4.2.1 freigestellten Rotation Momente um die Verbindungsachse auf. Diese konnten aufgrund ihrer Größe nicht ignoriert werden. Die x-Achsen der angrenzenden Koordinatensysteme wurden so angeordnet, dass sie parallel zur Verbindungsachse verlaufen. Somit stehen die dazugehörigen y-Achsen senkrecht zur Verbindungslinie und das Moment um die Verbindungsachse wird laut der beschriebenen Schnittgrößendefinitionen als  $m_y$  bezeichnet. Abbildung 4.19 zeigt den Verlauf des Momentes  $m_y$  nach der Neuorientierung der lokalen Koordinatensysteme entlang einer beispielhaft gewählten Linienverbindung im First unter unterschiedlichen Einstellungen bei der Definition der Liniengelenke. Die vier oberen Verlaufskurven repräsentieren die Verläufe für das betrachtete Moment bei einer Verdichtung an den Knotenpunkten, wie sie am Ende des Abschnitts 4.2.2 festgehalten wurde. Die schwarze Kurve entspricht dem Verlauf bei der Einstellung für steife Linienverbindungen. Die grüne Kurve entstammt der Berechnung mit den bisher beschriebenen Einstellungen. Der Verlauf ist sehr unregelmäßig und nimmt mit Ausnahme der hohen Werte im Bereich des Knotenpunktes am rechten Rand Werte von bis zu einem Kilonewtonmeter pro Meter an. Diese Werte verschwanden auch nicht in den Berechnungen, in denen die zusätzlichen Rotationen um die y- und die z-Achse freigestellt wurden. Die rote Kurve zeigt den Verlauf des Momentes, wenn im Eingabefeld aus Abbildung 4.6 zusätzlich das Moment  $M_y$  freigestellt wird. Die blaue Kurve entsteht, wenn alle drei Momentengelenke ausgewählt werden.

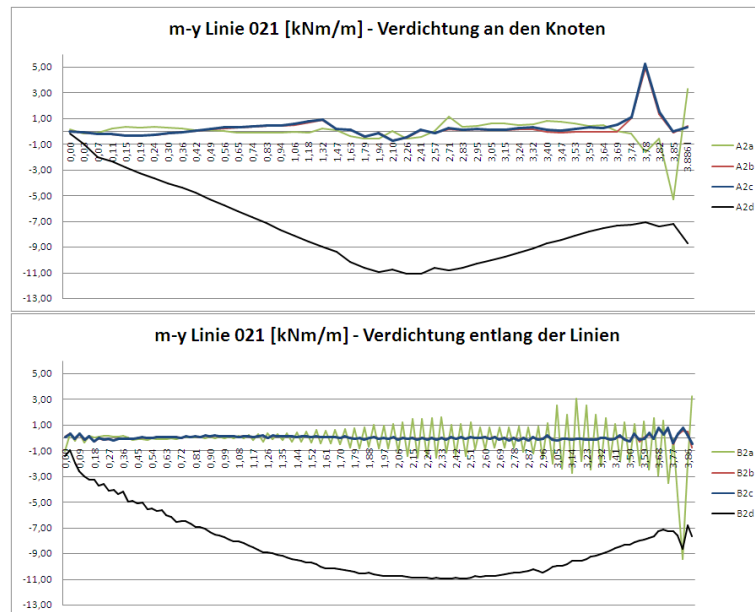


Abb. 4.19: Momente  $m_y$  in Beispielverbindung bei unterschiedlichen Einstellungen

Offensichtlich scheint jedoch die unterschiedliche Größe der finiten Elemente entlang der Linie zu Momenten zu führen, die an dieser Stelle eigentlich nicht auftreten dürften. Dadurch, dass das FE-Netz zu den Knoten immer dichter wird, werden somit die Elemente mit größerem Abstand von den Knoten immer größer. Im unteren Diagramm aus der Abbildung 4.19 wurden die gleichen Vergleichsrechnungen bei einer Verdichtung entlang der Linie mit einer einheitlichen Elementlänge von 3 cm durchgeführt. Wird lediglich das Gelenk um die Verbindungsängsachse freigestellt, so entsteht die grüne Kurve mit einem zick-zack-förmigen Verlauf. Der Mittelwert dieser springenden Werte dürfte null entsprechen. Stellt man nun zusätzlich noch die Momentengelenke  $M_y$  und  $M_z$  frei, so ergibt sich der flache Momentenverlauf in Form der blauen Linie, dessen Werte annähernd null sind.

Dies führte zu der Erkenntnis, dass die bisher getroffenen Einstellungen der FE-Netzverdichtung nicht verwendet werden können und somit noch einmal überarbeitet werden müssen.

## 4.4 Zusammenfassung der Einstellungen

Mit den aus den beschriebenen Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnissen können nun die Einstellungen festgehalten werden, die zu brauchbaren Ergebnissen führen. Diese werden anschließend auf die beiden Modelle der Tennishalle übertragen, um die Berechnungen mit gelenkigen und steifen Verbindungen durchzuführen. Als Abschluß dieses Kapitels sollen die verwendeten Einstellungen noch einmal in Tabelle 4.1 zusammengefaßt werden. Die anfängliche Variante der FE-Netzverdichtung an den Knoten wurde verworfen und durch eine Verdichtung entlang der Verbindungslinien ersetzt. Für eine Elementlänge von 3 cm erhält man vernünftige Ergebnisse. Als allgemeine FE-Länge bei der Netzverdichtung wurden 0,20 m gewählt, da die geometrischen Formen der generierten Elemente günstiger sind als bei einer allgemeinen FE-Länge von 0,40 m. Anstatt bei gelenkigen Verbindungen nur die Rotation um die Verbindungsängsachse

freizustellen, werden auch die anderen beiden Gelenke um die lokalen y- und z-Achse entlang der Linien freigestellt.

Tab. 4.1: Zusammenfassung der Programmeinstellung zur Berechnung der Tennishalle

Materialeigenschaften		
E-Modul:	8000	N/mm <sup>2</sup>
G-Modul:	500	N/mm <sup>2</sup>
Poissonzahl:	0,5	
Lagerbedingungen		
Linienlager entlang der Plattenkanten		
$u_x = u_y = u_z = 0$		
$\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$		
FE-Netzverdichtung		
Verdichtung entlang der Linien		
Elementlänge	0,03	m
allg. Elementlänge	0,20	m
Freiheitsgrade für gelenkige Verbindungen		
$u_x = u_y = u_z = 0$		
$\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z \neq 0$		
Freiheitsgrade für steife Verbindungen		
$u_x = u_y = u_z = 0$		
$\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$		



## 5 Vergleich der Berechnungen

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse aus den Berechnungen mit den im vorigen Kapitel 4 festgelegten Einstellungen verglichen werden. Dabei soll vor allem das Verformungsverhalten bei den beiden unterschiedlichen Verbindungsausführungen genauer betrachtet werden. Mit den am Ende des vorigen Kapitels festgelegten Einstellungen wurden für die beiden Konstruktionsvarianten Berechnungen durchgeführt und die erhaltenen Ergebnisse miteinander verglichen.

### 5.1 Verformungen

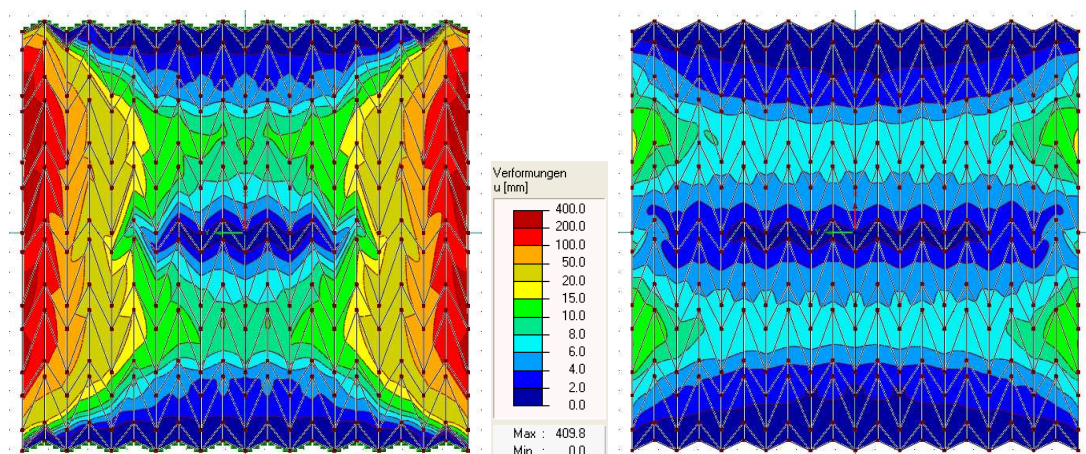


Abb. 5.1: Vergleich der Verformungen  $u$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)

In der Abbildung 5.1 sind in einer Draufsicht die Gesamtverformungen  $u$  für beide Verbindungsfälle dargestellt. Die linke Abbildung zeigt die Verformungen bei der Berechnung mit gelenkigen Linienverbindungen. Auf der rechten Seite sind die Verformungen dargestellt, die bei der Modellierung mit steifen Verbindungen ermittelt wurden. In beiden Fällen treten die stärksten Verformungen nicht wie zu erwarten im Firstbereich, sondern unterhalb des Bogenhöhepunkts auf. Die am stärksten verformten Bereiche liegen in beiden Fällen im freien ungestützten Rand. Ab der vierten Plattenreihe verringern sich die Verformungen stark und nehmen im First für beide Varianten ähnliche Werte an. Deutlich ist zu erkennen, dass die Verformungen bei gelenkigen Verbindungen drastisch höher ausfallen als bei steifen Verbindungen, was auch zu erwarten war. Die maximale Gesamtverformung liegt hier bei rund 400 mm. Damit wird die maximal zulässige Verformung von  $l/200$  bei einer Spannweite von rund 40 m deutlich überschritten. Diese wird mit 200 mm begrenzt. Bei steifen Verbindungen liegt die maximale Verformung  $u$  bei 16 mm und damit weit im zulässigen Bereich. Bei diesem Falwerk treten nicht nur hauptsächlich Verformungen  $u_z$  in vertikaler Richtung auf, sondern auch horizontale Verformungen  $u_x$  und  $u_y$ . Daher sollen im

folgenden in bestimmten Punkten die Verformungen in den drei globalen Verschiebungsrichtungen separat betrachtet werden. Dafür werden bestimmte Punkte ausgewählt, die in Abbildung 5.2 gekennzeichnet sind. Die gewählten Punkte liegen dabei in zwei unterschiedlichen Bereichen. Der erste Bereich A verläuft entlang der Kante im First. In diesem liegen die Punkte mit den Bezeichnungsnummern 50, 59, 158, 269 und 1023. Punkt 50 liegt dabei direkt am Rand, während die Punkte 59, 158 und 269 in den darauffolgenden Bogenfalten liegen. Der letzte Punkt dient einem Vergleich mit der verformungsschwachen Mitte der Struktur und liegt deshalb auf der Symmetrieebene XZ. Der zweite Bereich B, der betrachtet werden soll, liegt auf der Höhe der größten Verformungen für gelenkige und steife Verbindungen. Die Knoten haben hier von außen nach innen verlaufend die Bezeichnung 74, 75, 182, 291 und 1043.

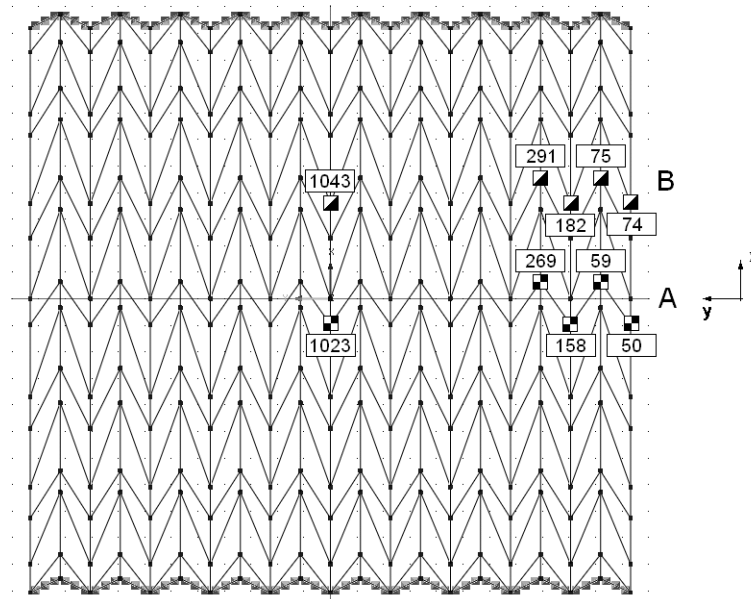


Abb. 5.2: Knotenkennzeichnung für die Verformungsauswertung

Zunächst sollen die drei Verformungen  $u_x$ ,  $u_y$  und  $u_z$  in den fünf Knoten aus Bereich A dargestellt und verglichen werden. Dies geschieht mit Hilfe der Abbildung 5.3. Dort sind nebeneinander die Verformungen in die drei globalen Verschiebungsrichtungen dargestellt. In einem Diagramm werden die Verformungen für gelenkige und für steife Linienverbindungen gegenübergestellt. Die blauen Werte repräsentieren die Verformungen der gelenkigen Variante, die roten stehen für die steifen Verbindungen. Wie man auf einem ersten Blick erkennen kann, bestätigt sich hier, dass die Verformungen bei gelenkiger Ausführung deutlich größer ausfallen. Überraschenderweise sind es jedoch nicht die vertikalen Verformungen  $u_z$ , die übermäßig groß ausfallen, sondern vielmehr die horizontalen Verschiebungen. Das gilt vor allem für die gelenkigen Verbindungen. Während sich die vertikalen Verschiebungen bei steifen Verbindungen im Vergleich zu den gelenkigen ungefähr halbieren, liegen die horizontalen Verschiebungen auf die blaue Kurve bezogen im verschwindend kleinen Bereich. Die Verformungen  $u_y$  sind größer null, dass heißt, dass der Rand der Struktur durch die Belastung nach innen gezogen wird. Die Z-Achse ist positiv nach oben definiert, das bedeutet, dass auch die Punkte am Rand nach oben statt wie zu erwarten nach unten verschoben werden. Auffallend ist auch, dass die Verformungen in der Mitte der Struktur für gelenkige und steife Verbindungen im gleichen Bereich liegen. Die Art der Verbindungsausführung scheint in diesem Bereich keinen großen Einfluß auf die Verformungen zu haben.



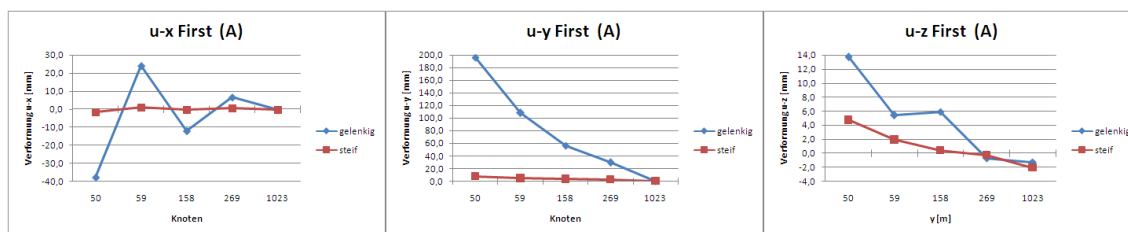


Abb. 5.3: Verschiebungen der Knoten im Bereich A

Die bisherigen Aussagen beziehen sich auf die Knotenverschiebungen im First. Allerdings treten die größten Verformungen in einem anderen Bereich unterhalb des Firstbereiches auf. Dieser wird in der Abbildung 5.2 mit B gekennzeichnet und die entsprechenden Knotenverschiebungen werden in den Diagrammen in der Abbildung 5.4 graphisch dargestellt. Auch hier liegen die Verformungen bei gelenkiger Verbindungsmodellierung sehr deutlich über den Ergebnissen aus der Berechnung mit biegesteifen Verbindungen. An dieser Stelle trifft das auch auf die vertikalen Verformungen  $u_z$  zu. Sie liegen hier alle im negativen Bereich, das heißt, dass hier eine wirkliche, sehr große Durchbiegung auftritt. Auch hier treten diese großen Verformungsunterschiede vor allem in den ersten drei Knoten am Rand auf. Zur Mitte hin gleichen sich die Verformungen wieder auf ähnliche Werte an.

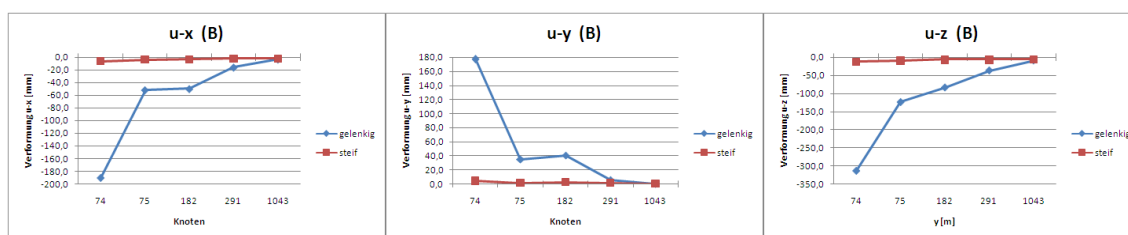


Abb. 5.4: Verschiebungen der Knoten im Bereich B

Allgemein lässt sich sagen, dass die Unterschiede bei den Verformungen am Rand im Bereich B deutlich größer sind als im First. Die Tabelle 5.1 stellt die Faktoren zusammen, um die die Verformungen aus der gelenkigen Berechnung jene aus der steifen Berechnung übersteigen. In den Knoten 50 und 74, die beide im ungestützten Rand liegen, übersteigen die Verformungen bei gelenkigen Verbindungen die Werte für steife Verbindungen um mehr als das zwanzigfache. Nur die vertikalen Verformungen im First haben sich lediglich verdreifacht. Im Bereich B liegt der Faktor der Verformungsunterschiede in Y-Richtung bei 45.

Die starken Verformungen bei gelenkigen Verbindungen nehmen so große Ausmaße an, dass eine Verwendung dieses Verbindungstyps ohne zusätzliche aussteifende Maßnahmen nicht durchführbar ist. Eine Ausführung mit den deutlich aufwendigeren steifen Linienverbindungen führt zu deutlich günstigeren Verformungen, die im zulässigen Bereich liegen. Die großen vertikalen Verformungen ließen sich durch die Anordnung von Stützen beschränken. Aufgrund der Tatsache, dass diese im First auch bei gelenkigen Verbindungen im erträglichen Bereich liegen, kann die Annahme getroffen werden, dass eine versetzte Anordnung der Stützen im Bereich der größten Verformungen, beispielsweise im Bereich B, sinnvoll wäre. Die horizontalen Verformungen in X-Richtung könnten durch eine Anordnung eines filigranen Fachwerkverbands in der Bogenöffnungsebene verringert werden. Problematisch bleiben die Verformungen in Y-Richtung, die die Platten im Rand nach

Tab. 5.1: Tabellarische Gegenüberstellung der Verformungen

		Verschiebungen			
Bereich:	Knoten-Nr:	u-x	u-y	u-z	
A	Rand	50	22,4	27,3	2,9
		59	30,0	25,1	2,8
		158	20,3	17,6	14,8
		269	16,3	11,3	2,3
	Mitte	1023	1,0	0,0	0,6
B	Rand	74	29,3	45,4	25,3
		75	12,9	25,0	13,3
		182	14,3	19,1	12,7
		291	6,1	4,4	5,3
	Mitte	1043	1,5	0,0	1,4

innen ziehen. Diese können nicht durch eine Anordnung zusätzlicher ausstützender Maßnahmen ausgeglichen werden. Vielmehr müssten hier die Platten untereinander ausgesteift werden, das heißt, dass die Faltungen in Y-Richtungen ausgesteift werden müssen. Diese Erkenntnisse fließen später in die Modifizierungsvorschläge in Kapitel 8 ein.

## 5.2 Grundschnittgrößen

Nach den Verformungen werden die Grundschnittgrößen miteinander verglichen. Die Grundschnittgrößen beschreiben die Schnittgrößen bezogen auf die lokalen Koordinatensysteme in den Platten. Diese wurden in Abschnitt 4.1.5 so festgelegt, dass die lokalen x-Achsen parallel zum Bogenrand verlaufen. Die z-Achsen stehen orthogonal auf den jeweiligen Flächen und zeigen somit in unterschiedliche Richtungen. Die Definition der Schnittgrößen in einem Plattenelement kann der Abbildung 4.2 in Abschnitt 4.1.4 entnommen werden.

Im Anhang A werden die berechneten Grundschnittgrößen graphisch gegenübergestellt. Weil die Verteilung der Schnittkräfte symmetrisch zur XY-Ebene ist, wird jeweils nur eine Hälfte der Struktur abgebildet. Auf der linken Bildhälfte sind die Schnittgrößen für die Berechnung mit gelenkigen Verbindungen dargestellt. Die rechte Hälfte repräsentiert die Schnittgrößen bei steifen Linienverbindungen. Hier sind in allen Vergleichen große Unterschiede im Randbereich zu erkennen. Bei gelenkigen Verbindungen steigen die Schnittgrößen im Randbereich stark an, während sie bei steifen Verbindungen in diesem Bereich nur leicht zunehmen. Bei den Momenten und der Normalkraft  $n_x$  ist das sehr deutlich zu sehen. Es ist festzustellen, dass sich diese starken Unterschiede vor allem auf die äußersten vier Plattenreihen beschränken, während zur Mitte hin die Schnittgrößen für gelenkige und steife Verbindungen in den meisten Fällen ähnliche Werte annehmen. Die Beanspruchungen links liegen hier nur noch geringfügig über denen im rechten Bild. Für die Beanspruchungen in y-Richtung liegen sie bei freier Rotation um die Verbindungsachse in den Flächen sogar etwas niedriger. Dies ist eine wichtige Erkenntnis für spätere Berechnungen mit den orthotropen BSP-Platten. Diese haben durch ihren Aufbau in y-Richtung eine geringere Steifigkeit und Festigkeit als in x-Richtung.

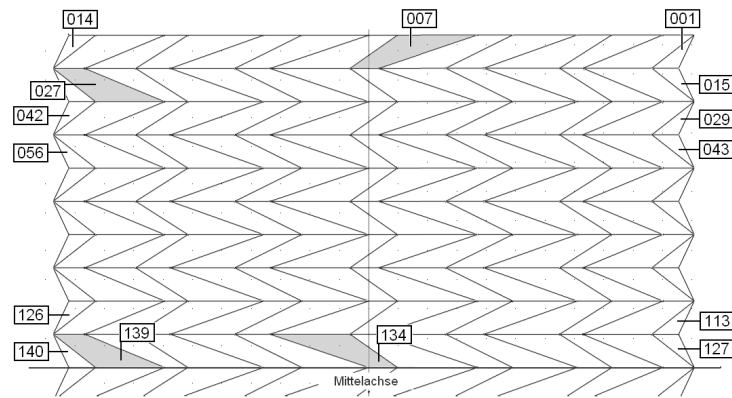


Abb. 5.5: Draufsicht mit Plattenbezeichnungen

Nach dem graphischen Vergleich werden anhand von zwei ausgewählten Platten die Grundschnittgrößen zahlenmäßig gegenübergestellt. Beide Flächen sind in der Abbildung 5.5 hervorgehoben. Eine davon liegt im First und trägt die Nummer 7. Hier liegen die Werte in den Darstellungen aus Anhang A im größten Bereich. Die andere befindet sich im Bereich der Auflager und wird mit 27 bezeichnet. Hier liegt ein zweiter stark beanspruchter Bereich der Struktur. Aus diesen Bereichen der Struktur werden die jeweiligen extremalen Grundschnittgrößen entnommen und in Tabelle 5.2 miteinander verglichen. Der Faktor ist der Quotient aus gelenkig und steif. Für die meisten Vergleiche ergibt sich ein Faktor größer eins, das bedeutet, dass die jeweilige Schnittgröße bei gelenkigen Verbindungen größer ist als bei steifen Verbindungen. Vereinzelt entstehen bei gelenkigen Verbindungen günstigere Schnittgrößen als bei steifen.

Tab. 5.2: Vergleich der maximalen Grundschnittgrößen in den Flächen 7 und 27

Fläche 007

[Angaben in kN/m bzw. kNm/m]

	max m-x	max n-x	max v-x	max m-y	max n-y	max v-y	max m-xy	max n-xy
gelenkig	5,86	242,18	20,46	14,09	44,03	11,23	9,10	59,79
steif	5,21	24,11	7,41	9,21	6,05	23,73	2,80	183,66
Faktor	1,1	10,0	2,8	1,5	7,3	0,5	3,3	0,3
	min m-x	min n-x	min v-x	min m-y	min n-y	min v-y	min m-xy	min n-xy
gelenkig	-30,83	-624,32	-96,68	-0,20	-96,61	-40,44	-10,94	-43,22
steif	-4,11	-252,26	-11,95	-3,63	-179,66	-2,67	-1,86	-6,84
Faktor	7,5	2,5	8,1	0,1	0,5	15,1	5,9	6,3

Fläche 027

[Angaben in kN/m bzw. kNm/m]

	max m-x	max n-x	max v-x	max m-y	max n-y	max v-y	max m-xy	max n-xy
gelenkig	22,51	460,05	72,84	2,13	258,95	31,16	6,82	1,18
steif	2,08	37,28	0,12	3,18	45,97	0,43	0,63	3,47
Faktor	10,8	12,3	607,0	0,7	5,6	72,5	10,8	0,3
	min m-x	min n-x	min v-x	min m-y	min n-y	min v-y	min m-xy	min n-xy
gelenkig	-5,38	-35,42	-58,23	-15,27	-14,77	-64,39	-7,49	-257,94
steif	-3,44	-101,53	-5,22	-4,07	-7,10	-6,57	-0,94	-35,17
Faktor	1,6	0,3	11,2	3,8	2,1	9,8	8,0	7,3

Aus der Mitte der Struktur werden die selben Vergleiche an zwei Platten an äquivalenter Position durchgeführt. Sie sind ebenfalls in Abbildung 5.5 eingezeichnet und haben die Plattennummern 134 und 139. Das Ergebnis zeigt Tabelle 5.3. Hier fallen wie erwartet die Unterschiede zwischen gelenkig und steif deutlich geringer aus. Bis auf den Fall für die maximale Schubkraft  $n_{xy}$  liegen die Faktoren alle im einstelligen Bereich. In vielen Fällen liegt der Vergleichsfaktor unter eins, das bedeutet, dass die gelenkigen Verbindungen günstigere Schnittgrößen erzeugen. Dies gilt

vor allem bei den Beanspruchungen in y-Richtung. Insgesamt sind die Beanspruchungen deutlich geringer als in den Platten 7 und 27. Die Erkenntnis aus der Betrachtung der graphischen Schnittgrößendarstellungen spiegelt sich hier wieder.

Tab. 5.3: Vergleich der maximalen Grundschnittgrößen in den Flächen 134 und 139

Fläche 134

[Angaben in kN/m bzw. kNm/m]

	max m-x	max n-x	max v-x	max m-y	max n-y	max v-y	max m-xy	max n-xy
gelenkig	2,50	37,11	7,91	1,64	94,53	2,41	1,84	18,44
steif	1,71	63,03	2,70	2,06	40,07	2,74	0,71	1,27
Faktor	1,5	0,6	2,9	0,8	2,4	0,9	2,6	14,5
	min m-x	min n-x	min v-x	min m-y	min n-y	min v-y	min m-xy	min n-xy
gelenkig	-2,85	-148,55	-4,36	-1,69	-7,59	-5,30	-1,74	-39,71
steif	-5,28	-147,62	-14,78	-5,28	-110,27	-4,39	-0,87	-137,93
Faktor	0,5	1,0	0,3	0,3	0,1	1,2	2,0	0,3

Fläche 139

[Angaben in kN/m bzw. kNm/m]

	max m-x	max n-x	max v-x	max m-y	max n-y	max v-y	max m-xy	max n-xy
gelenkig	1,86	-7,76	9,44	1,38	44,42	6,60	1,38	20,31
steif	1,48	-15,87	1,23	3,11	40,23	9,87	0,26	13,44
Faktor	1,3	0,5	7,7	0,4	1,1	0,7	5,3	1,5
	min m-x	min n-x	min v-x	min m-y	min n-y	min v-y	min m-xy	min n-xy
gelenkig	-1,69	-146,81	-23,28	-0,53	-4,49	-3,63	-1,89	-6,97
steif	-2,14	-127,53	-2,64	-1,96	-4,75	-3,27	-0,37	-5,81
Faktor	0,8	1,2	8,8	0,3	0,9	1,1	5,1	1,2

Im anschließenden Kapitel werden die betrachteten Schnittgrößen in Spannungen umgerechnet und diese in den zwei ausgewählten Platten der Struktur nachgewiesen. Dort kann das Tragverhalten noch genauer betrachtet werden.

## 5.3 Spannungen

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden die auftretenden Spannungen verglichen. Bereits im Abschnitt 4.3.1 wurde darauf verwiesen, dass in den Bereichen der Knotenpunkte Spannungsspitzen infolge numerischer Schwierigkeiten auftreten. Dadurch, dass aus einem Bereich, hier einer speziellen Platte, die maximalen Spannungen entnommen werden, verfälschen diese Spannungsspitzen die Auswertung. Durch die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Veränderungen konnten die auftretenden Spannungen jedoch bis zu einem gewissen Grad entschärft werden.

Aus verschiedenen Bereichen der Struktur werden in diesem Abschnitt die Hauptspannungen entnommen und untereinander verglichen. Sie wurden bereits im Abschnitt 4.3.1 kurz erläutert. Sie entsprechen nicht wie bei den Grundschnittgrößen den Spannungen in Richtung der lokalen Achsensystem und somit den Hauptrichtungen der BSP-Platte, sondern repräsentieren die maximal auftretenden Spannungen. Die Bereiche, in denen die Spannungen gegenübergestellt werden, sollen anhand der Abbildung 5.5 erläutert werden. Es werden Spannungen aus insgesamt sechs Bereichen betrachtet. Der erste Bereich umfasst die ersten vierzehn Platten am ungestützten Rand mit den Nummern 1 bis 14. Anschließend wird von außen nach innen fortgefahren. Den zweiten Bereich bilden also die Flächen 15 bis 28, den dritten die Flächen 29 bis 42 und den vierten die Flächen 43 bis 56. Für den Vergleich mit der Mitte werden zusätzlich zwei weitere Bereiche betrachtet. Sie umfassen die Flächen 113 bis 126 sowie die Flächen 127 bis 140. Abbildung 5.6 zeigt die entnommenen Hauptspannungen von innen nach außen. Die gestrichelten Linien stehen für die Hauptspannungen aus der Berechnung mit gelenkigen Verbindungen. Bei

den durchgezogenen Linien handelt es sich um die Spannungen aus der zweiten Berechnung mit steifen Verbindungen. Die Spannung  $\sigma_{1+}$  ist die maximal auftretende Normalspannung an der Plattenoberkante. Die maximale Normalspannung an der Plattenunterkante wird mit  $\sigma_{1-}$  bezeichnet. Als dritte Spannungsart wird die Schubspannung  $\tau$  betrachtet. Der erste Wert im Diagramm ist der ersten Plattenreihe am Rand entnommen. Hier liegen alle Hauptspannungen aus der gelenkigen Berechnung deutlich über denen aus der steifen Berechnung. Sie sind ungefähr fünfmal größer. Je weiter der Betrachtungsbereich nach innen rückt, nähern sich die Werte immer mehr an, bis sie sich schließlich in der Mitte in der selben Größenordnung bewegen. Hier ist auch gut zu sehen, dass die Beanspruchungen bei gelenkigen Verbindungen zum Rand hin stärker ansteigen, als bei steifen Verbindungen. Bei letzteren verändern sich die Spannungen nur sehr schwach.

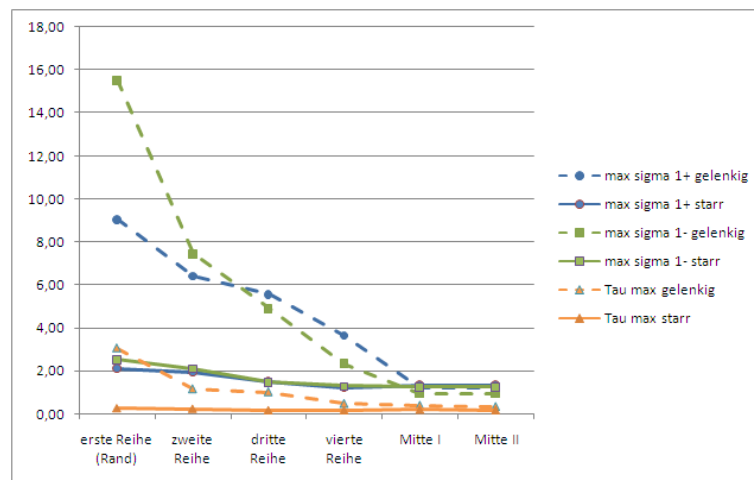


Abb. 5.6: Vergleich der Hauptspannungen in den Plattenreihen

## 6 Plattennachweise

An ausgewählten Platten soll in diesem Kapitel ein Spannungsnachweis nach DIN 1052:2004-08 durchgeführt werden. Dies geschieht einmal anhand der gelenkigen Berechnung und einmal anhand der steifen Variante. Die Auswahl der nachzuweisenden Platten erfolgt mit Hilfe der grafischen Schnittgrößendarstellungen im Anhang A. Es werden Platten nachgewiesen, in denen in diesen Darstellungen die größten Belastungen auftreten. Diese liegen vor allem im ungestützten Randbereich. Nachdem die Nachweise durchgeführt wurden, werden die Belastungen mit einer äquivalenten Platte aus dem Zentrum der Bogenkonstruktion verglichen, wo die Belastungen deutlich geringer ausfallen.

Als erstes soll daher die Nachweisführung, wie sie in der DIN aufgeführt wird, erläutert werden und die Verwendung mit den in der Berechnung gewonnenen Schnittgrößen beschrieben werden. Anschließend werden die erforderlichen Steifigkeitswerte und Kenngrößen an einem gewählten Plattenaufbau bestimmt und das Verfahren der Nachweisführung darauf angewandt. Dies geschieht mit Hilfe von automatisierten Nachweistabellen, deren Verwendung an einem Beispiel beschrieben werden soll.

### 6.1 Nachweisführung nach DIN 1052:2004-08

Die DIN 1052:2004-08 [16] ist das erste europäische Normwerk, in dem die Nachweisführungen für Brettspertholzplatten geregelt ist [17]. Der Anhang D *Flächen aus Schichten - Steifigkeitswerte und Spannungsberechnung* beschreibt ausführlich, wie die Steifigkeitswerte und die Spannungen für den geschichteten Aufbau der Platten ermittelt werden können. Die Steifigkeitswerte werden dabei auf die Mittelfläche bezogen und nach der Verbundtheorie mit starrem Verbund berechnet. Die Bezeichnung der Scheiben- und Plattenschnittgrößen und der dazugehörigen Normal- und Schubspannungen in den Schichten ist in Abbildung 6.1 an einem Plattenausschnitt dargestellt. Bei den Plattenschnittgrößen ist zu beachten, dass die Bezeichnung der Momente  $m_x$  und  $m_y$  nicht den gewohnten Bezeichnungen als Stabschnittgröße entspricht. Während bei einem Stab das Moment  $m_x$  das Moment beschreibt, das um die x-Achse dreht, so handelt es sich in diesem Fall um das Moment, das Spannungen in x-Richtung erzeugt, und somit um die y-Achse dreht. Ebenso verhält es sich bei dem Moment  $m_y$ . Es erzeugt Spannungen in y-Richtung und dreht um die x-Achse.

Die Nachweise der Spannungen sind für jede Schicht  $i$  des Querschnitts zu führen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Beanspruchungen in Faserrichtung und Beanspruchungen rechtwinklig zur Faserrichtung. Für erstere sind folgende Bedingungen einzuhalten:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (6.1)$$

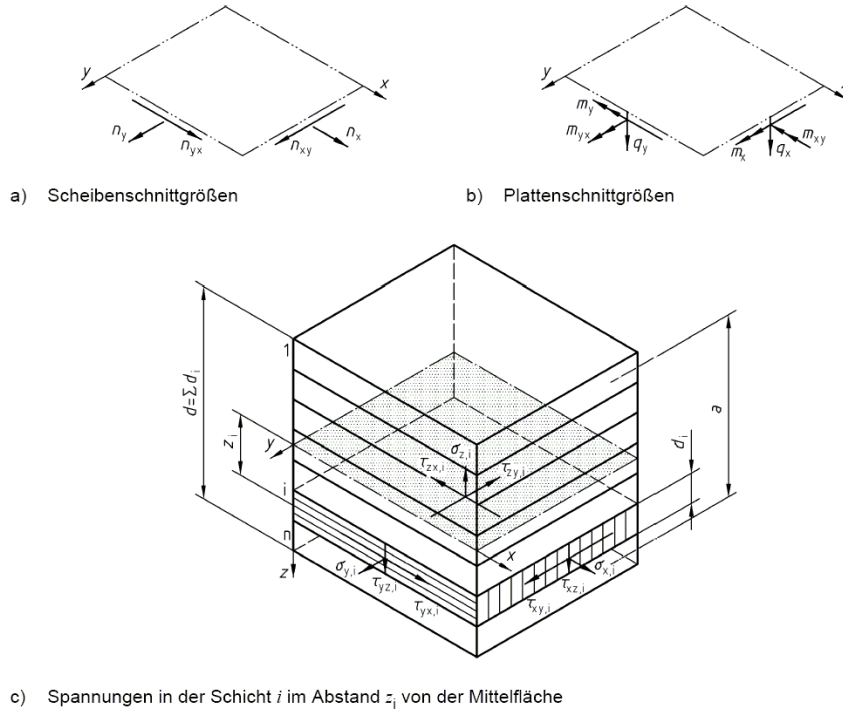


Abb. 6.1: Bezeichnung der Scheiben- und Plattenschnittgrößen an einem Plattenausschnitt [16]

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (6.2)$$

$$\left(\frac{\tau_d}{f_{v,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,d}}{f_{v,d}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.3)$$

Dabei sind:

- $\sigma_{t,0,d}$  Bemessungswert der Zugspannungen in Faserrichtung im Schwerpunkt der Schicht,
- $\sigma_{c,0,d}$  Bemessungswert der Druckspannungen in Faserrichtung im Schwerpunkt der Schicht,
- $\sigma_{m,d}$  Bemessungswert der Biegespannungen im Querschnitt der Schicht,
- $\tau_{xy,d}$  Bemessungswert der Schubspannungen in der  $xy$ -Ebene aus  $m_{xy}$  und  $n_{xy}$  in der Schicht,
- $\tau_d$  Bemessungswert der Schubspannungen aus der Querkraft  $v_x$  bzw.  $v_y$  in der Schicht.

Es ist zu beachten, dass  $\sigma_{t,0,d}$  beziehungsweise  $\sigma_{c,0,d}$  die Bemessungswerte der Normalspannungen im Schwerpunkt der Schicht sind, das heißt die Summe aus der Normalspannung aus der Normalkraft und dem Mittelwert der Biegespannungen am oberen und unteren Rand der betreffenden Schicht. Der Anteil  $\sigma_{m,d}$  repräsentiert lediglich die Abweichungen von diesem gemittelten Normalkraftanteil aufgrund der Biegung über den Schichtquerschnitt.

Bei der Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung spielt der Rollschub eine entscheidende Rolle. Es sind die Bedingungen 6.4 bis 6.5 einzuhalten.

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}} + \frac{\tau_{R,d}}{f_{R,d}} \quad (6.4)$$

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{f_{c,90,d}} + \frac{\tau_{R,d}}{f_{R,d}} \quad (6.5)$$

Hier sind:

$\sigma_{t,90,d}$  Bemessungswert der Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung in der Schicht

$\sigma_{c,90,d}$  Bemessungswert der Druckspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung in der Schicht

$\tau_{R,d}$  Bemessungswert der Rollschubspannung in der Schicht

Hier sind  $\sigma_{t,0,d}$  und  $\sigma_{c,0,d}$  die Bemessungswerte aus der Superposition von m und n an der betreffenden Stelle. Laut DIN 1052:2004-08, Anhang D.1 (4) darf der E-Modul senkrecht zur Faserrichtung  $E_{90}$  mit null angenommen werden, wenn die Seitenflächen der Bretter nicht verklebt sind.

Die Grundschnittgrößen, die in diesem Kapitel betrachtet werden sollen, entsprechen den Schnittgrößen in Richtung der in Abschnitt 4.1.5 festgelegten lokalen Koordinatensysteme. Wenn wir nun zum Beispiel die Nachweise für die ermittelten Schnittgrößen in x-Richtung durchführen wollen, so müssen in den beiden Deckschichten die Nachweise 6.1 bis 6.3 und in der Querlage die Nachweise 6.4 und 6.5 erfüllt werden. Bei einer Betrachtung der Grundschnittgrößen in y-Richtung ist es genau umgekehrt. In den Deckschichten müssen die Nachweise 6.4 und 6.5 erfüllt sein und in der Querlage die Nachweise 6.1 bis 6.3. Die Formeln zur Ermittlung der Spannungen sind in der DIN angegeben und werden im folgenden aufgelistet. Die Bestimmung der Steifigkeitswerte B, S und D wird im Anschluß in Abschnitt 6.2 erläutert.

### Plattenbeanspruchung

Biegung um die y-Achse -  $m_x$ :

$$\sigma_x = E_x \cdot \frac{m_x}{B_x} \cdot z \quad (6.6)$$

Biegung um die x-Achse -  $m_y$ :

$$\sigma_y = E_y \cdot \frac{m_y}{B_y} \cdot z \quad (6.7)$$

Verwindung der xy-Ebene -  $m_{xy}$ :

$$\tau_{xy} = G_{xy} \cdot \frac{m_{xy}}{B_{xy}} \cdot z \quad (6.8)$$

Schubverformung der xz-Ebene -  $v_x$ :



$$\tau_{xz} = \frac{E \cdot S_x}{B_x} \cdot q_x \quad (6.9)$$

Schubverformung der yz-Ebene -  $v_y$ :

$$\tau_{yz} = \frac{E \cdot S_y}{B_y} \cdot q_y \quad (6.10)$$

### Scheibenbeanspruchung

Dehnung in x-Richtung -  $n_x$ :

$$\sigma_{x,i} = E_{x,i} \cdot \frac{n_x}{D_x} \quad (6.11)$$

Dehnung in y-Richtung -  $n_y$ :

$$\sigma_{y,i} = E_{y,i} \cdot \frac{n_y}{D_y} \quad (6.12)$$

Gleitung in der xy-Ebene -  $n_{xy}$ :

$$\tau_{xy,i} = G_{xy,i} \cdot \frac{n_{xy}}{D_{xy}} \quad (6.13)$$

Damit lassen sich die Spannungen infolge jeder einzelnen Beanspruchungsart in jedem Punkt des Querschnitts ermitteln, die dann in die Nachweise in den Gleichungen 6.1 bis 6.5 eingehen. Dort werden sie den werkstoffspezifischen Festigkeiten gegenübergestellt. Bevor allerdings die Spannungen in den Querschnittspunkten ermittelt werden können, müssen die Steifigkeitswerte der Platten ermittelt werden. Dies soll in folgendem Abschnitt geschehen.

## 6.2 Steifigkeitswerte der BSP-Platte

Brettspertholz besteht aus mehreren Lagen orthogonal zueinander verleimten Brettlagen. Der Querschnitt einer BSP-Platte kann sich daher bei gleichbleibender Bauteildicke unterschiedlich zusammensetzen. So kann sowohl die Dicke der Einzelschichten als auch deren Anzahl variiert werden. Derzeit werden verschiedene Brettspertholzplatten angeboten. HANI BURI hat in [18] einige von ihnen zusammengestellt. Aus dieser Zusammenstellung wurde die Brettspertholzplatte vom Typ *Schillinger* für die weitere Betrachtung ausgewählt. Platten dieses Typs sind in einer Dicke von 27 mm bis 500 mm verfügbar bei einer Breite von 3.0 m und einer Länge von 13.7 m. Die Dicke und die Anzahl der Schichten ist bis zu 21 Schichten frei wählbar. Die Längsstöße der Bretter werden mittels Keilzinkung verleimt. Die Bretter der Decklagen entsprechen der Festigkeitsklasse C24, die Bretter der Mittellagen werden der Festigkeitsklasse C20 zugeordnet. Aus Tabelle F.5 der DIN 1052:2004-08 [16] können die entsprechenden Elastizitäts- und Schubmodule entnommen werden. Sie werden in Tabelle 6.1 zusammengestellt.

Tab. 6.1: Steifigkeitskennwerte für Nadelholz der Festigkeitsklassen C20 und C24 [N/mm<sup>2</sup>]

Festigkeitsklasse	C20	C24
E-Modul parallel $E_{0,\text{mean}}$	9500	11000
E-Modul rechtwinklig $E_{90,\text{mean}}$	320	370
Schubmodul $G_{\text{mean}}$	590	690

Diese müssen laut DIN 1052:2004-08, Anhang D.1 (5) anschließend noch durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M = 1,3$  dividiert werden. Damit lassen sich nun die Biege- und Drillsteifigkeiten für die Plattenbeanspruchungen sowie die Dehnsteifigkeiten für die Scheibenbeanspruchungen eines Plattenquerschnitts bestimmen. Der Aufbau dieses Querschnitts wird wie folgt gewählt:

- dreischichtiger Plattenaufbau
- Schichtdicke 50 mm
- Bretter der Mittellagen nicht seitenverleimt

Durch diesen Plattenaufbau entspricht die Dicke der BSP-Platte der in der Berechnung verwendeten Plattendicke des isotropen Werkstoffs.

Im Anhang D der DIN 1052:2004-08 werden Formeln zur Ermittlung der Steifigkeiten angegeben. Diese unterscheiden sich wiederum in Plattensteifigkeiten und Scheibensteifigkeiten. Sind die Bretter der Mittellage wie in diesem Fall nicht seitenverleimt, so ist der Elastizitätsmodul in diesem Bereich bei einer Belastung rechtwinklig zur Faserrichtung gleich null zu setzen. Bei den Plattensteifigkeiten für die Biegung  $B_x$  und  $B_y$  werden folgende Gleichungen verwendet:

$$B_x = B_{xS} + B_{xE} = \sum B_{xS,i} + \sum B_{xE,i} = \sum E_{x,i} \cdot d_i \cdot z_i^2 + \sum E_{x,i} \cdot \frac{d_i^2}{12} \quad (6.14)$$

$$B_y = B_{yS} + B_{yE} = \sum B_{yS,i} + \sum B_{yE,i} = \sum E_{y,i} \cdot d_i \cdot z_i^2 + \sum E_{y,i} \cdot \frac{d_i^2}{12} \quad (6.15)$$

Anhang B zeigt in Tabelle B.1 die Ermittlung der beiden Biegesteifigkeiten sowie der Drillsteifigkeit  $B_{xy}$ , die sich wiederum mit folgender Formel berechnet:

$$B_{xy} = B_{xyS} + B_{xyE} = \sum B_{xyS,i} + \sum B_{xyE,i} = \sum 2 \cdot G_{xy} \cdot d_i \cdot z_i^2 + \sum G_{xy,i} \cdot \frac{d_i^2}{6} \quad (6.16)$$

Für die Schubbeanspruchungen durch die Querkraft  $v_x$  beziehungsweise  $v_y$  in den Gleichungen 6.9 und 6.10 müssen zusätzlich die Schubsteifigkeiten  $S_x$  und  $S_y$  ermittelt werden. Dies geschieht mit Hilfe der Formeln 6.17 und 6.18.

$$E \cdot S_x = \int E_x \cdot z' \cdot dz' \quad (6.17)$$

$$E \cdot S_y = \int E_y \cdot z' \cdot dz' \quad (6.18)$$

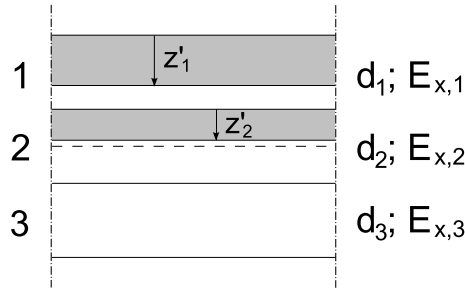


Abb. 6.2: Festlegung der Integrationskonstante  $z'$

Das Ergebnis der Berechnungen zeigt Tabelle B.2 in Anhang B. Wenn man die Schubspannung in einem Punkt des Querschnitts sucht, müssen die Schubsteifigkeit in diesem Punkt in Gleichung 6.9 beziehungsweise 6.10 eingesetzt werden. Als Betrachtungspunkte wurden die sechs Schichtoberbeziehungsweise Schichtunterkanten sowie die Schichtmitten gewählt. Die Integrationskonstante  $z'$  soll an der Plattenoberkante beginnen. Sobald ein Übergang von der ersten Schicht zur mittleren erreicht ist, wechselt der E-Modul und es wird eine neues  $z'_i$  eingeführt. Zu dem neuen Integral wird die Summe der bereits durchlaufenden Schicht 1 hinzuaddiert. Der Verlauf der Schubsteifigkeit über den Querschnitt verläuft symmetrisch zur Symetrieachse, so dass die Berechnung nur bis zur Plattenmitte durchgeführt werden muss.

Somit verbleiben noch die Steifigkeitswerte für die Scheibenbeanspruchungen zu ermitteln. Die Berechnung der Dehnsteifigkeiten  $D_x$  und  $D_y$  ist relativ einfach und erfolgt über die Gleichungen 6.19 und 6.20.

$$D_x = \sum E_{x,i} \cdot d_i \quad (6.19)$$

$$D_y = \sum E_{y,i} \cdot d_i \quad (6.20)$$

Für die Berechnung der Gleitung in der  $xy$ -Ebene infolge der Schubkraft  $n_{xy}$  mit Hilfe der Gleichung 6.13 benötigt man die Schubsteifigkeit  $D_{xy}$ , die sich über folgende Formel bestimmt.

$$D_{xy} = \sum G_{xy,i} \cdot d_i \quad (6.21)$$

In der Querlage muss laut [16] der Wert des Schubmoduls  $G_{xy}$  geviertelt werden, da hier die Schmalseiten der Brettlagen nicht verleimt werden. Tabelle B.3 im Anhang B zeigt die Berechnungstabellen für die Scheibensteifigkeiten.

In Tabelle 6.2 sind noch einmal alle Ergebnisse für die Berechnung der Steifigkeitswerte zusammengefasst.

Tab. 6.2: Platten- und Scheibensteifigkeiten der BSP-Platte

Plattensteifigkeiten		
	x-Richtung	y-Richtung
Biegesteifigkeit B	2292 [kNm <sup>2</sup> /m]	134 [kNm <sup>2</sup> /m]
Drillsteifigkeit B <sub>xy</sub>	221 [kNm <sup>2</sup> /m]	
Scheibensteifigkeiten		
Dehnsteifigkeit D	846154 [kN/m]	393846 [kN/m]
Schubsteifigkeit D <sub>xy</sub>	58750 [kN/m]	

Damit lassen sich nun die erforderlichen Spannungen ermitteln und die notwendigen Nachweise in der betreffenden Platte durchführen.

## 6.3 Nachweise und Vergleich

### 6.3.1 Kombination der Schnittgrößen

Da bei den Nachweisen mindestens zwei Schnittgrößen in die Berechnung einfließen, müssen für jede einzelne Schnittgröße die Extremalwerte und die dazugehörigen Werte der verbleibenden auftretenden Schnittgrößen ermittelt werden. Am Beispiel der Nachweisbedingungen 6.1 und 6.2 bedeutet das, dass vier Nachweise zu führen sind, davon zwei für das maximale und das minimale  $n_x$  mit den dazugehörigen  $m_x$ , sowie zwei für das maximale und das minimale  $m_x$  und den dazugehörigen  $n_x$ . RFEM kann die ermittelten Werte in EXCEL-Tabellen exportieren, in denen die verschiedenen Schnittgrößen in einem Punkt aufgelistet werden. Somit kann man sich die Extremalwerte für eine Fläche und die dazugehörigen erforderlichen Schnittgrößen schnell anzeigen lassen. Die Tabellen B.4 und B.5 im Anhang B.2 zeigen jeweils für gelenkige als auch für steife Verbindungsanschlüsse die Ausgabe der Grundschnittgrößen durch RFEM in eine EXCEL-Datei anhand des Beispiels der Fläche 007. Für jeden Rasterpunkt sind dabei die globalen Koordinaten und die Grundschnittgrößen bezogen auf die festgelegten lokalen Koordinatensysteme der Platten aus Abschnitt 4.1.5 angegeben. Wie bereits erwähnt, fließen in einen Nachweis mehrere Grundschnittgrößen zusammen ein. Daher werden in einem nächsten Schritt für jede der fünf maßgebenden Schnittgrößen  $m$ ,  $n$ ,  $v$ ,  $m_{xy}$  und  $n_{xy}$  pro Richtung die beiden Extremalwerte aus diesen Tabellen gezogen. Diesen müssen zudem die Schnittgrößen, die zusätzlich in den Nachweis einfließenden, hinzugefügt werden. Das Ergebnis der Zusammenstellung der Schnittgrößen für die Nachweise ist beispielhaft anhand der Fläche 007 für die x-Richtung in Tabelle B.6 und für die y-Richtung in Tabelle B.7 dargestellt. In diesen Tabellen findet zugleich eine Gegenüberstellung zwischen gelenkiger und steifer Ausführung statt. Die Tabelle 6.3 gibt eine Übersicht, welche weiteren Schnittgrößen zu den maßgebenden Schnittgrößen in die Nachweise eingehen und welche Nachweise in den jeweiligen Schichten durchgeführt werden müssen. Dabei wird noch einmal deutlich, dass die in den Schichten erforderlichen Nachweise mit der Beanspruchungsrichtung wechseln. Die erforderlichen Nachweise in den Deckschichten bei einer Beanspruchung in x-Richtung entsprechen den Nachweisen in der Querlage bei einer Beanspruchung in y-Richtung und umgekehrt.

Tab. 6.3: Übersicht über maßgebende und ergänzende Schnittgrößen für die Nachweisführung.

maßgebende Schnittgröße	Deckschichten	Nachweis	Querlage	Nachweis
$\mathbf{m_x}$	$n_x$	6.1 / 6.2	$n_x ; v_x$	6.4 / 6.5
$\mathbf{n_x}$	$m_x$	6.1 / 6.2	$m_x ; v_x$	6.4 / 6.5
$\mathbf{v_x}$	$m_{xy} ; n_{xy}$	6.3	$m_x ; n_x$	6.4 / 6.5
$\mathbf{m_{xy}}$	$v_x ; n_{xy}$	6.3		
$\mathbf{n_{xy}}$	$v_x ; m_{xy}$	6.3		
$\mathbf{m_y}$	$n_y ; v_y$	6.4 / 6.5	$n_y$	6.1 / 6.2
$\mathbf{n_y}$	$m_y ; v_y$	6.4 / 6.5	$m_y$	6.1 / 6.2
$\mathbf{v_y}$	$m_y ; n_y$	6.4 / 6.5	$m_{xy} ; n_{xy}$	6.3
$\mathbf{m_{xy}}$			$v_y ; n_{xy}$	6.3
$\mathbf{n_{xy}}$			$v_y ; m_{xy}$	6.3

In den Nachweisen werden die ermittelten Spannungen den werkstoffspezifischen Festigkeiten gegenübergestellt. Tabelle 6.4 fasst die Bemessungsfestigkeiten der beiden im Plattenaufbau verwendeten Festigkeitsklassen zusammen. Die charakteristischen Festigkeiten wurden der Tabelle F.5 aus der DIN 1052 [16] entnommen und mit dem Modifikationsfaktor  $k_{mod}$  multipliziert und durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  dividiert. Der Modifikationsfaktor wird vereinfacht mit 0,9 angenommen.

$$k_{mod} = 0,9 \quad ; \quad \gamma_M = 1,3 \quad \rightarrow \quad R_d = k_{mod} \cdot \frac{R_k}{\gamma_M}$$

Tab. 6.4: Bemessungsfestigkeiten der verwendeten Festigkeitsklassen in N/mm<sup>2</sup>

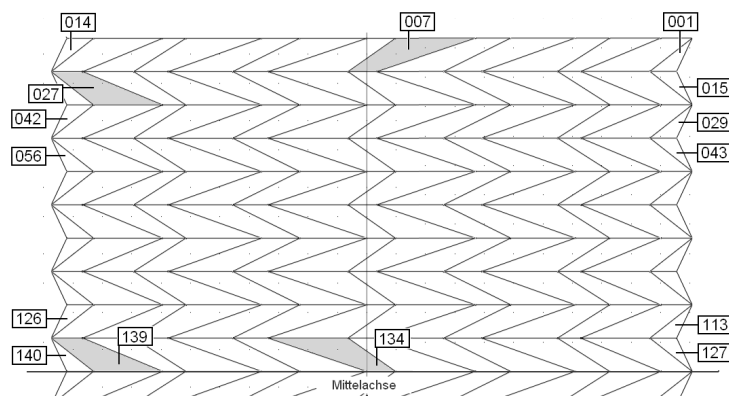
		Festigkeitsklasse	
		Deckschicht	Querlage
		C 24	C 20
Biegung	$f_{m,d}$	16,62	13,85
Zug parallel	$f_{t,0,d}$	9,69	8,31
Zug rechtwinklig	$f_{t,90,d}$	0,28	0,28
Druck parallel	$f_{c,0,d}$	14,54	13,15
Druck rechtwinklig	$f_{c,90,d}$	1,73	1,59
Schub und Torsion	$f_{v,d}$	1,87	1,87
Rollschub	$f_{Rd}$	0,69	0,69

In den erwähnten Nachweistabellen werden in jedem der betrachteten Punkte im Querschnitt die Spannungen mit Hilfe der Gleichungen 6.6 bis 6.13 berechnet und wie in den Nachweisbedingungen 6.1 bis 6.5 gefordert den Festigkeiten gegenübergestellt. Bei der Nachweisführung werden sieben Punkte, die Plattenunterkante, die Plattenoberkante, die Schichtübergänge sowie die Querschnittssymmetrieachse, wo die Schubspannungen durch die Querkraft am größten sind, betrachtet. Zusammen macht das  $2 \cdot 5 \cdot 7 = 70$  Nachweise, die in einer Platte durchzuführen sind. Um das Verfahren zu beschleunigen und den Schreibaufwand zu begrenzen, wurden die erforderlichen Formeln in EXCEL-Tabellen eingegeben und die Nachweisführung automatisiert. Diese Tabellen sollen anhand eines Beispiels beschrieben werden. Die weiteren Nachweisberechnungen werden anschließend in gleicher Weise durchgeführt. Durch die relativ schnelle und einfache

Berechnung der Nachweise kann dann im Anschluß eine Übersicht erstellt werden, in der die Problempunkte bei den Nachweisen der Platten ersichtlich werden.

Abbildung 6.3 zeigt eine Draufsicht auf eine Hälfte der Struktur mit den Plattenbezeichnungen. Die Platten, die hier beispielhaft nachgewiesen werden, werden aufgrund der graphischen Darstellung der Schnittgrößen im Anhang A ausgewählt. Die linke Hälfte der Abbildungen zeigt die Schnittgrößen bei gelenkiger und die rechte Seite die Schnittgrößen bei steifer Ausführung. Ein erster Blick zeigt, dass in den Platten im ungestützten Randbereich sowohl bei gelenkiger als auch steifer Ausführung besonders große Schnittgrößen auftreten. Als erstes soll hier eine Platte im Firstbereich durchgerechnet werden. Diese hat die Plattennummer 007. An dieser wird die Verwendung der Tabellen bei gelenkiger Ausführung beschrieben. Bei steifer Ausführung müssen nur die Eingabewerte der Grundschnittgrößen verändert werden. Anschließend werden die Ergebnisse mit den Auswertungen an einer Platte aus dem gestützten Bereich im Zentrum der Struktur verglichen.

Abb. 6.3: Draufsicht mit Plattenbezeichnungen



### 6.3.2 Verwendung der Nachweistabellen

Im Anhang B.3 sind die verschiedenen Nachweistabellen für die einzelnen Schnittgrößen in Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung angefügt. An diesen soll das Vorgehen in den Tabellen beschrieben werden. Es werden einmal die Nachweise für den maximalen und einmal für den minimalen Wert der betreffenden maßgebenden Schnittgröße durchgeführt. Unterschieden wird dabei je nach Beanspruchungsrichtung in Nachweise senkrecht und Nachweise parallel zur Faserrichtung der betreffenden Schicht, wie es in der DIN 1052 [16] gefordert wird. Im Tabellenkopf sind die erforderlichen Steifigkeitswerte aufgeführt. In den beiden äußeren Schichten werden zwei Punkte an der Ober- beziehungsweise Unterkante betrachtet. In der Mittelschicht wird zudem noch die Mitte der Schicht nachgewiesen, da hier die Schubspannungen durch die Querkraft am größten sind. Als erstes werden die Schnittgrößen in Spannungen in den erwähnten Punkten mit den Gleichungen 6.6 bis 6.13 umgerechnet. Anschließend werden die einzelnen Spannungen aus den verschiedenen Schnittgrößen zu den beiden entscheidenden Spannungstypen in den entsprechenden Nachweisen aus Abschnitt 6.1 zusammengefasst und abschließend der jeweiligen Bemessungsfestigkeit aus Tabelle 6.4 gegenübergestellt. Somit erhalten wir in jedem Punkt einen Wert, der für die Erfüllung des Nachweises unter 1,0 liegen muss. Es folgen kurze Beschreibungen der Tabellen für die einzelnen Schnittgrößen.

**Moment  $m$**  Bei einem Moment  $m_x$  werden die Fasern der Decklagen parallel und die Fasern der Mittelschicht senkrecht beansprucht. In den Decklagen ist daher der Nachweis 6.1 beziehungsweise 6.2 zu erfüllen. Die Normalspannungen werden erzeugt durch das Moment  $m_x$  und der dazugehörigen Normalkraft  $n_x$ . Der Mittelwert der Normalspannungen in der Schicht berechnet sich aus dem Mittelwert der beiden äußeren Biegenormalspannungen plus der Normalspannung aus der Normalkraft. Den Biegespannungsanteil bildet lediglich die Differenz zwischen der gemittelten Biegespannung und den jeweiligen äußeren Biegespannungen. Damit sind die beiden Komponenten des Nachweises vorhanden und können überprüft werden. Bei positiven Spannungen, also Zug, werden die Spannungen der zulässigen Zugspannung gegenübergestellt. Negative Spannungen bedeuten Druck und werden mit der zulässigen Druckspannung nachgewiesen.

In der Mittelschicht sind die beiden Nachweise 6.4 und 6.5 zu erfüllen. Da jedoch die Seitenflächen der Bretter in der Mittellage nicht verklebt sind, wird der E-Modul in diesem Bereich mit null angenommen und somit entstehen in diesem Bereich keine Normalspannungen quer zur Faser. Lediglich die zu dem Moment gehörende Querkraft  $v_x$  erzeugt eine Schubspannung, die dem Nachweis auf Rollschub unterzogen werden muss.

Das Ergebnis für die gewählte Beispielfläche zeigt Tabelle B.14.

Bei Beanspruchung in y-Richtung ändern sich zwangsläufig die Beanspruchungsrichtungen in den Schichten. Somit müssen in den Deckschichten die Nachweise 6.4 und 6.5 und in der Mittellage die Nachweise 6.1 beziehungsweise 6.2 durchgeführt werden. Die Normalspannungen in den Deckschichten bestimmen sich nun aus direkter Superposition der Normalspannungen aus Normalkraft und Biegung. In der Mittellage entspricht das Vorgehen wie vorher bei Beanspruchung in x-Richtung beschrieben.

Tabelle B.15 zeigt die Nachweise in y-Richtung in der Fläche 007.

**Normalkraft  $n$**  Das Vorgehen bei der Nachweisführung mit der Normalkraft als maßgebende Schnittgröße in den Tabellen unterscheidet sich nicht zu dem vorher beschriebenen für die Momente. Die Tabellen B.16 und B.17 zeigen das an dem verwendeten Beispiel.

**Querkraft  $v$**  Wird die Querkraft als maßgebende Schnittgröße angesehen, wird in der Schicht parallel zur Beanspruchungsrichtung der Nachweis 6.3 erforderlich. Dieser berücksichtigt die Schubspannungen durch die betreffende Querkraft als auch die Schubspannungen aus dem Drillmoment  $m_{xy}$  und der Schubkraft  $n_{xy}$ . Diese lassen sich in den betreffenden Punkten durch die Formeln 6.8 bis 6.10 und 6.13 einfach ermitteln. Die Schubspannungen aus  $m_{xy}$  und  $n_{xy}$  werden addiert und zusammen mit der Schubspannung aus der Querkraft in die Nachweisformel 6.3 eingesetzt. In der Schicht, deren Faser senkrecht zur Beanspruchungsrichtung liegt, werden die Nachweise 6.4 und 6.5 durchgeführt. Hier werden zu der Schubspannung aus Querkraftbeanspruchung die Normalspannungen aus dem dazugehörigen Moment und der dazugehörigen Normalkraft benötigt. Sie werden wie oben beschrieben durch Superposition zusammengefasst.

Den Nachweis in x-Richtung zeigt Tabelle B.18, den Nachweis in y-Richtung Tabelle B.19.

**Drillmoment  $m_{xy}$**  Bei den Nachweisen mit dem Drillmoment als ausschlaggebende Bemessungsschnittgröße ist einzig der Nachweis 6.3 zu erfüllen. In allen anderen Nachweisen kommen durch

das Drillmoment erzeugte Spannungen nicht vor. Der Nachweis 6.3 wird dabei lediglich in den Schichten gefordert, deren Fasern parallel zur Beanspruchungsrichtung ausgerichtet sind. In den Fasern senkrecht dazu ist kein Nachweis mit Schubspannungen aus dem Drillmoment gefordert. Schubspannungen in der  $xy$ -Ebene werden ebenfalls durch die Schubkraft  $n_{xy}$  erzeugt. Die beiden Summanden für diese Komponente des Nachweises berechnen sich durch die Gleichungen 6.8 und 6.13. Die zu  $m_{xy}$  gehörige Querkraft erzeugt Schubspannungen in der  $xz$ - beziehungsweise  $yz$ -Ebene, die in die zweite Komponente des Nachweises eingehen.

Zu sehen sind die Nachweise mit dem Drillmoment als maßgebende Schnittgröße in Tabelle B.20 und B.21.

**Schubkraft  $n_{xy}$**  Die Schubkraft  $n_{xy}$  erzeugt wie das Drillmoment Schubspannungen in der  $xy$ -Ebene. Somit gelten hier die gleichen Bestimmungen wie bei Nachweisen mit  $m_{xy}$  als maßgebende Schnittgröße.

Die Tabellen B.22 und B.23 zeigen die entsprechenden Berechnungen.

Mit diesen Tabellen sollen die Nachweise durchgeführt und anschließend zusammengestellt werden. Alle anschließenden Nachweise erfolgen nach demselben Schema und sollen nicht weiter dokumentiert werden. Vielmehr sollen im folgenden Schritt die Ergebnisse der Nachweise untereinander verglichen werden.

### 6.3.3 Vergleich der Nachweise

#### 6.3.3.1 Fläche 007

Aus den im vorigen Abschnitt beschriebenen Tabellen werden nach der Eingabe der betreffenden Schnittgrößen die Ergebnisse der Nachweise entnommen. Diese werden in einer weiteren Tabelle zusammengefasst und für die Fälle gelenkig und steif miteinander verglichen. Tabelle 6.5 zeigt diese Gegenüberstellung für die Beanspruchungen in  $x$ -Richtung für besagte Fläche 007. Links stehen die beschriebenen maßgebenden Schnittgrößen. Für den extremalen positiven und den extremalen negativen Wert werden die Ergebnisse der Nachweise in den sieben betrachteten Punkten im Querschnitt dargestellt. Punkt 1 ist die Plattenunterkante, Punkt 7 die Plattenoberkante. Die grau unterlegten Flächen kennzeichnen die Querschnittslagen, deren Faserrichtung parallel zur Beanspruchungsrichtung liegt. Die obere Hälfte zeigt die Ergebnisse für die gelenkige Variante und die untere Hälfte die Ergebnisse für die Berechnung mit steifen Linienverbindungen. Wie man sehen kann, werden sowohl bei der gelenkigen als auch bei der steifen Variante einige Nachweise nicht erfüllt. Ein Problem bei gelenkigen Verbindungen ist der Rollschub in der Querlage. Hinzu kommen Probleme bei den Schubspannungen in der  $xy$ -Ebene der Deckschichten. Bei biegesteifen Verbindungen scheinen vor allem die Beanspruchungen durch das Drillmoment  $m_{xy}$  und die Schubkraft  $n_{xy}$  stark zuzunehmen, während die Nachweise auf Biegung und Normalkraft ausreichend erfüllt werden. Die drei Versagensfälle für  $v_x$ ,  $m_{xy}$  und  $n_{xy}$  bei steifen Verbindungen treten alle an der selben Stelle auf, wie ein Blick auf Tabelle B.6 im Anhang B zeigt.



Tab. 6.5: Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 007

Fläche: 007

x-Richtung

				Nachweispunkte im Querschnitt						
				1	2	3	4	5	6	7
gelenkig	maßgebende Schnittgröße	$m_x$	max	0,39	0,39	0,02	0,02	0,02	0,53	0,53
			min	0,51	0,51	1,29	1,29	1,29	0,84	0,84
		$n_x$	max	0,29	0,29	0,03	0,03	0,03	0,23	0,23
			min	0,42	0,42	0,02	0,02	0,02	0,47	0,47
		$v_x$	max	0,88	0,06	0,27	0,27	0,27	0,22	1,36
			min	1,15	0,38	1,29	1,29	1,29	0,09	0,27
		$m_{xy}$	max	1,28	0,30				0,01	0,39
			min	0,88	0,06				0,22	1,36
$n_{xy}$	max	0,15	0,11				0,08	0,06		
	min	0,20	0,09				0,02	0,00		

				1	2	3	4	5	6	7
steif	maßgebende Schnittgröße	$m_x$	max	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,12	0,12
			min	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09	0,12	0,12
		$n_x$	max	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10
			min	0,23	0,23	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15
		$v_x$	max	0,01	0,00	0,10	0,10	0,10	0,00	0,00
			min	1,50	1,10	0,16	0,16	0,16	0,75	0,47
		$m_{xy}$	max	1,50	1,10				0,75	0,47
			min	0,04	0,01				0,00	0,02
$n_{xy}$	max	1,50	1,10				0,75	0,47		
	min	0,04	0,01				0,00	0,02		

Bei den Nachweisen in y-Richtung treten sehr große Überschreitungen der zulässigen Spannungen bei beiden Berechnungsvarianten auf. Das liegt unter anderem daran, dass die Seitenflächen der Bretter in den Decklagen miteinander verklebt sind. Somit treten in diesen Bereichen Zugspannungen quer zur Faser auf, was bei Holz sehr schnell zum Versagen führt. Würde man die Mitwirkung der Deckschichten bei Normalspannungsbeanspruchung senkrecht zur Faserrichtung vernachlässigen, könnte die Mittellage die Biegung nicht abtragen. Bei gelenkigen Anschlüssen überschreiten zudem auch die Normalspannungen parallel zur Faser in der Mittelschicht die zulässigen Festigkeitswerte beim maximalen positiven Moment.

Tab. 6.6: Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in y-Richtung in Fläche 007

Fläche: 007

y-Richtung

			Nachweispunkte im Querschnitt							
			1	2	3	4	5	6	7	
gelenkig	maßgebende Schnittgröße	$m_y$	max	8,15	2,81	1,44	0,05	1,44	0,48	1,28
			min	0,02	0,06	0,02	0,00	0,02	0,10	0,12
		$n_y$	max	0,27	0,17	0,12	0,10	0,12	0,07	0,01
			min	0,00	0,03	0,18	0,14	0,18	0,06	0,08
		$v_y$	max	0,02	0,01	0,03	0,05	0,04	0,04	0,12
			min	6,44	2,19	0,48	0,47	0,02	0,38	1,03
		$m_{xy}$	max			0,22	0,05	0,00		
			min			0,04	0,01	0,16		
		$n_{xy}$	max			0,08	0,07	0,06		
			min			0,03	0,03	0,04		
			1	2	3	4	5	6	7	
steif	maßgebende Schnittgröße	$m_y$	max	5,17	1,68	0,97	0,07	0,97	0,34	0,87
			min	0,34	0,17	0,37	0,01	0,37	0,73	2,06
		$n_y$	max	1,07	0,41	0,19	0,01	0,19	0,09	0,17
			min	0,32	0,27	0,51	0,25	0,51	0,15	1,04
		$v_y$	max	0,32	0,17	0,90	0,90	0,75	0,05	1,04
			min	0,67	0,22	0,01	0,02	0,03	0,04	0,11
		$m_{xy}$	max			0,81	0,75	0,55		
			min			0,01	0,00	0,00		
		$n_{xy}$	max			0,81	0,75	0,55		
			min			0,01	0,01	0,00		

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl bei gelenkiger als auch bei steifer Verbindungsausführung die Platten im Firstbereich am Rand so stark beansprucht werden, dass ein Versagen zu erwarten ist. Besonders kritisch ist dabei die Beanspruchung der Decklagen, sobald die resultierenden Spannungen senkrecht zur Faserrichtung angreifen. Die Überschreitungen der zulässigen Spannungen sind hier so groß, dass auch bei einer Veränderung der Plattendicke keine zufriedenstellenden Ergebnisse der Nachweise zu erwarten sind. Hier müssen strukturelle Veränderungen getroffen werden, die diese Platten entlasten.

Die Werte der Nachweise der Platte am Rand soll nun mit ein Pendant aus dem Mittelbereich verglichen werden. Die graphischen Schnittgrößendarstellungen aus dem Anhang A zeigen, dass die Beanspruchungen hier deutlich geringer ausfallen als am ungestützten Rand. Die Tabellen B.24 und B.25 zeigen die Ergebnisse der Nachweise in der äquivalenten Fläche in diesem Bereich. Diese Fläche hat die Nummer 134 und ist ebenfalls in Abbildung 6.3 markiert. Deutlich zu erkennen ist, dass die Übertragung der Beanspruchungen in x-Richtung keine großen Probleme bei der Nachweisführung darstellt. Alle Nachweise werden ausreichend erfüllt.

Ein Problem besteht weiterhin bei den Beanspruchungen in y-Richtung. Zwar fallen diese deutlich geringer aus als am Rand, dennoch werden die zulässigen Spannungen teilweise um das zweifache überschritten. Überraschenderweise werden vor allem bei der Variante mit den steifen Linienverbindungen mehr Nachweise nicht erfüllt als bei der gelenkigen Variante. Das Problem bei der Übertragung der Beanspruchungen in y-Richtung bleibt also auch im Zentrum der Struktur, wenn auch deutlich abgeschwächt, erhalten.

### 6.3.3.2 Fläche 027

Nach der Betrachtung einer Fläche im Firstbereich soll nun eine Platte in der Nähe der Auflager betrachtet werden. Als besonders interessant erscheint nach der Betrachtung der graphischen Schnittgrößendarstellungen in Anhang A die Fläche mit der Nummer 027. Diese liegt in der zweiten Reihe der Brettsper Holzplatten an zweiter Stelle nach dem Auflager. Besonders die Belastung durch die Normalkraft  $n_x$  und  $n_y$  ist hier für gelenkige Verbindungen sehr groß. Die Werte für das Drillmoment  $m_{xy}$  und die Schubkraft  $n_{xy}$  liegen hier ebenfalls im größtmöglichen Bereich. Ein Blick auf die Zusammenstellung der Nachweisergebnisse für Belastungen in x-Richtung in Tabelle 6.7 zeigt sehr deutlich, dass bei gelenkigen Verbindungen ein Großteil der Nachweise, in denen Schubspannungen eine Rolle spielen, deutliche Probleme aufweisen. Dies betrifft dabei ausschließlich die beiden Deckschichten. Bei steifen Verbindungen wiederum werden die Nachweise überraschend deutlich erfüllt.

Problematischer wird es, wenn die Beanspruchungen in y-Richtung nachgewiesen werden sollen. Die Tabelle 6.8 zeigt sehr deutliche Überschreitungen bei der Berechnung mit gelenkigen Verbindungen. Die Stelle mit der maximalsten Normalkraft  $n_y$  stimmt hier mit der Stelle überein, an der das Moment  $m_y$  den extremalen negativen Wert annimmt. Die sehr starken Überschreitungen der zulässigen Spannungen erklären sich abermals durch die geringe Zugfestigkeit der Brettlagen bei Zugspannungen senkrecht zur Faser. Doch auch die Nachweise in der Mittelschicht, wo die Holzfasern in Richtung der Beanspruchung ausgerichtet sind, werden hier nicht erfüllt. Die Überschreitungen sind so groß, dass auch ein dickerer Plattenaufbau erst bei sehr starker Erhöhung des BSP-Querschnitts vernünftige Verbesserungen erzielen würde. Vielmehr zeigt auch

dieses Beispiel, dass die gesamte Struktur in der Form sowohl mit gelenkigen als auch steifen Verbindungsausführungen zusätzliche aussteifende Maßnahmen im Randbereich erfordert.

Wenn man nun diese Ergebnisse wieder mit einer Platte aus dem Zentrum der Struktur vergleicht, kann man feststellen, dass hier für gelenkige Verbindungsausführungen alle Nachweise erfüllt werden. Das zeigt die Tabelle B.26 für die Fläche Nummer 139. Dagegen werden drei Nachweise bei der Zusammenstellung für steife Linienverbindungen nicht erfüllt. Die Tatsache, dass im Zentrum die Nachweise für eine Struktur mit gelenkigen Anschlüssen leichter erfüllt werden als bei steifen Anschlüssen, findet sich also sowohl in der Platte im Firstbereich als auch in der Nähe der Auflager wieder. Dies gilt auch für die Beanspruchungen in Richtung der festgelegten y-Achse. Hier werden ebenfalls alle Nachweise ausreichend erfüllt, wenn die Verbindungen gelenkig ausgeführt werden.

Tab. 6.7: Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 027

Fläche: 027

x-Richtung

			Nachweispunkte im Querschnitt						
			1	2	3	4	5	6	7
gelenkig	m <sub>x</sub>	max	0,52	0,52	0,51	0,52	0,51	0,44	0,44
		min	0,16	0,16	0,97	0,97	0,97	0,36	0,36
	n <sub>x</sub>	max	0,47	0,47	0,78	0,78	0,78	0,49	0,49
		min	0,52	0,52	0,51	0,52	0,51	0,44	0,44
	v <sub>x</sub>	max	0,21	0,21	0,97	0,97	0,97	0,16	0,07
		min	1,38	1,69	0,78	0,78	0,78	1,99	2,28
	m <sub>xy</sub>	max	0,05	0,45				1,23	2,39
		min	0,82	0,18				0,00	0,29
	n <sub>xy</sub>	max	0,01	0,01				0,01	0,00
		min	1,38	1,69				1,99	2,28
steif	m <sub>x</sub>	max	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,07	0,07
		min	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,12	0,12
	n <sub>x</sub>	max	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,12	0,12
		min	0,06	0,06	0,03	0,03	0,03	0,11	0,11
	v <sub>x</sub>	max	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		min	0,00	0,00	0,07	0,07	0,07	0,00	0,00
	m <sub>xy</sub>	max	0,00	0,00				0,01	0,01
		min	0,07	0,05				0,02	0,01
	n <sub>xy</sub>	max	0,00	0,00				0,00	0,00
		min	0,07	0,05				0,02	0,01

Tab. 6.8: Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 027

Fläche: 027

y-Richtung

			Nachweispunkte im Querschnitt							
			1	2	3	4	5	6	7	
gelenkig	maßgebende Schnittgröße	$m_y$	max	1,22	0,42	0,21	0,00	0,21	0,08	0,20
			min	1,29	0,43	2,08	0,58	2,08	3,67	9,44
		$n_y$	max	1,29	0,43	2,08	0,58	2,08	3,67	9,44
			min	0,08	0,04	0,10	0,02	0,10	0,12	0,44
		$v_y$	max	0,12	0,03	1,11	1,29	1,20	0,71	1,42
			min	0,99	0,41	0,25	0,77	0,17	2,28	6,36
		$m_{xy}$	max			0,33	0,58	0,90		
			min			0,13	0,03	0,00		
$n_{xy}$	max			0,00	0,00	0,00				
	min			1,22	1,46	1,44				
			1	2	3	4	5	6	7	
steif	maßgebende Schnittgröße	$m_y$	max	1,86	0,65	0,35	0,03	0,35	0,09	0,29
			min	0,37	0,15	0,45	0,05	0,45	0,86	2,39
		$n_y$	max	0,19	0,06	0,32	0,10	0,32	0,56	1,41
			min	0,09	0,05	0,11	0,01	0,11	0,19	0,54
		$v_y$	max	1,86	0,65	0,07	0,07	0,07	0,09	0,29
			min	0,11	0,04	0,06	0,05	0,03	0,22	0,67
		$m_{xy}$	max			0,00	0,00	0,00		
			min			0,03	0,02	0,02		
$n_{xy}$	max			0,00	0,00	0,00				
	min			0,03	0,03	0,02				

## 6.4 Gewonnene Erkenntnisse

Die Berechnung der Nachweise an den beiden Beispielen bestätigt die Annahme, dass die gefaltete Struktur ohne zusätzliche aussteifende Maßnahmen im ungestützten Randbereich nicht ausreichend tragfähig ist. Sowohl bei gelenkigen als auch bei biegesteifen Plattenanschlüssen treten Spannungen auf, die die zulässigen Festigkeitswerte der verwendeten Holzarten deutlich übersteigen. Zwar könnte durch die Verwendung eines dickeren Plattenaufbaus für einige Nachweise eine Verbesserung erzielt werden, doch werden einige Festigkeiten so stark überschritten, dass hier voraussichtliche Plattendicken erforderlich wären, die ein vertretbares Maß übersteigen. Das Prinzip der Faltwerke basiert gerade auf der Verwendung dünner Plattenquerschnitte im Bezug auf die Spannweite.

Besonders kritisch ist das Verhalten bei der Übertragung von Spannungen senkrecht zu Faserichtung der Deckschichten. Die geringen Festigkeiten von Holz bei Beanspruchung auf Druck oder Zug senkrecht zur Faser führen sehr schnell zum Versagen. Bei Platten, die im ungestörten Bereich in der Mitte der Struktur liegen, liegen deutlich geringere Beanspruchungen vor, so dass hier die Nachweise zu besseren Ergebnissen führen. Besonders günstig scheint das Tragverhalten, wenn hier die Verbindungen zwischen den einzelnen Platten gelenkig ausgeführt werden, während im Randbereich günstigere Ergebnisse für steife Verbindungen erzielt werden.

Zu untersuchen bleibt in weiteren Schritten weiterhin die Verteilung der Schnittgrößen innerhalb der Platte. Für die Berechnung wurden Platten mit einem isotropen Materialverhalten angenommen, während die Platten, an denen die Nachweise durchgeführt wurden, große Unterschiede in den Steifigkeiten und Festigkeiten aufweisen. Diese sind in der Richtung senkrecht zur Faserichtung der Deckschichten deutlich geringer als in der Hauptrichtung der BSP-Platte. Es ist anzunehmen, dass sich die Belastungen unter Einbezug dieser Orthogonalität mehr hin zur

Hauptspannungsrichtung der Platten, der Faserrichtung der Decklagen, verteilen und die Platten in y-Richtung weniger belastet werden. Dies ist in weiteren Berechnungen unabhängig von den erforderlichen strukturellen Veränderungen zu untersuchen.

## 7 Die Linienverbindungen

Ein entscheidender Punkt bei der Berechnung eines faltwerks sind die Nachweise der Verbindungen zwischen den einzelnen Plattenelementen. Bei den Versuchen am Prototyp des IBOIS, die in Abschnitt 2.3.1 beschrieben wurden, trat ein Versagen der Struktur zuerst in den Verbindungen auf, die jedoch ohne genauere Betrachtungen der Festigkeit mit Hilfe von selbstbohrenden Schrauben ausgeführt wurden. Um eine optimale Tragfähigkeit einer Faltstruktur zu erreichen, müssen daher ausreichend leistungsfähige Verbindungen entwickelt werden, die in der Lage sind, die auftretenden Kräfte von einer Platte in die nächste zu übertragen. Mit Hilfe von computergesteuerten Zuschnitten können die Platten so auf Gehung gesägt und vorgebohrt werden, dass eine einfache Montage auf der Baustelle möglich ist.

In diesem Kapitel soll anhand eines Beispiels beschrieben werden, wie die zu übertragenden Kräfte von dem verwendeten Statikprogramm ausgegeben und anschließend für die nachfolgenden Nachweise dargestellt werden. Anschließend werden zwei Verbindungsausführungen vorgeschlagen, in denen einmal die gelenkige und zum zweiten die steife Variante berücksichtigt werden. Auf Grundlage dieser Verbindungstechniken wird im folgenden ein Nachweis an einem ausgewählten Liniengelenk durchgeführt.

### 7.1 Zusammenstellung der zu übertragenden Kräfte

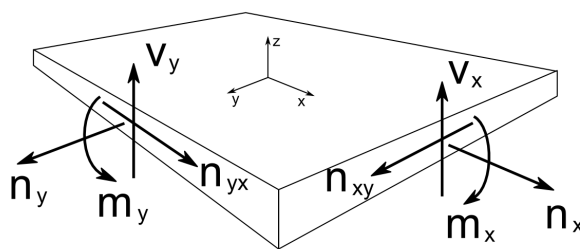


Abb. 7.1: Räumliche Darstellung der betrachteten Schnittgrößen in den Liniengelenken

Abbildung 7.1 zeigt noch einmal die Schnittgrößen in einer räumlichen Darstellung, die bei der Berechnung der Linienverbindungen betrachtet werden sollen und wie sie von RFEM definiert werden. Wichtig hierbei ist zu beachten, dass die Momente im Gegensatz zu den Stabschnittgrößen anders bezeichnet werden. Während in einem Stab das Moment  $m_x$  das Moment ist, dass um die x-Achse dreht, so bezeichnet es bei den Plattenschnittgrößen das Moment, das Spannungen in Richtung der x-Achse erzeugt. Betrachtet man die dargestellte x-Achse als Verlaufsrichtung des Liniengelenks, so bezeichnet  $n_y$  die Normalkraft, die senkrecht auf das Liniengelenk wirkt. Die Kraft  $n_{xy}$  stellt die Schubkraft in der Kontaktfläche zwischen den beiden Platten in

VerbindungsLängsrichtung dar. Die Querkraft  $v$ - $y$  wirkt in Richtung der  $z$ -Achse und steht somit ebenfalls senkrecht zum Verbindungsverlauf. Bei der steifen Gelenkausführung tritt zusätzlich ein Moment  $m$ - $y$  auf, das um die Längsachse der Verbindung dreht. In diesem Fall ist es positiv definiert, wenn in positiver  $z$ -Richtung, das heißt an der oberen Plattenkante, Zugspannungen entstehen.

### 7.1.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung von Schnittgrößen entlang einer Linie orientiert sich bei RFEM immer an den lokalen Koordinatensystemen der betrachteten Flächen. Diese wurden, wie in 4.1.5 beschrieben, so festgelegt, dass die  $x$ -Achse in der Fläche parallel zum Bogenverlauf verläuft. Dementsprechend wurde auch die Faserrichtung der Deckschicht festgelegt. Eine Vielzahl der Liniengelenke verlaufen jedoch nicht parallel zu den festgelegten Hauptrichtungen der Plattenquerkräfte, sondern stehen in einem gewissen Winkel zu diesen. Die Folge ist, dass sich bei der Ausgabe der Schnittgrößen in einem schräg verlaufenden Schnitt die dargestellten Werte nicht entlang der Richtung des Liniengelenkes, beziehungsweise senkrecht dazu, orientieren, sondern weiterhin auf die festgelegten Achsen des lokalen Koordinatensystems bezogen sind. Zur Bemessung der Verbindungen benötigen wir jedoch Schnittgrößen bezogen auf ein Achsensystem, dessen  $x$ -Achse entlang des Liniengelenks verläuft und dessen  $y$ -Achse senkrecht dazu in der Plattenebene liegt. Daher müssen die lokalen Koordinatensysteme vor der Ergebnisdarstellung gedreht und entlang der betrachteten Verbindung ausgerichtet werden. Abbildung 7.2 verbildlicht den Vorgang beispielhaft an einer gewählten Verbindungslinie zwischen den beiden Flächen 7 und 8. Sie befindet sich im First des Bogen im ungestützten Randbereich und soll für die anschließenden Erläuterungen beibehalten werden. Zu sehen ist die genaue Position in der Abbildung 7.15.

Das Ergebnis der Koordinatendrehung ist nun ein Schnittkraftverlauf bezogen auf das Achsensystem der Linie, dessen Anfang im Punkt A liegt und Richtung Punkt B verläuft. Die Darstellung der Ergebnisse im Programm RFEM ist beispielhaft in Abbildung 7.3 anhand der Schnittgrößen  $n$ - $y$  (oben) und  $v$ - $y$  (unten) am in Abbildung 7.2 gezeigten Beispiel abgebildet. Punkt A entspricht dem Ausgangspunkt der Linienverbindung und Punkt B dem Endpunkt. Nachdem in der ersten Hälfte der Linienvläufe die Schnittgrößen in den Elementen links von der Verbindungslinie angezeigt werden, beginnt in der zweiten Hälfte die Schittgrößendarstellung für die Elemente auf der rechten Seite des Liniengelenks wieder im Punkt A und verläuft in

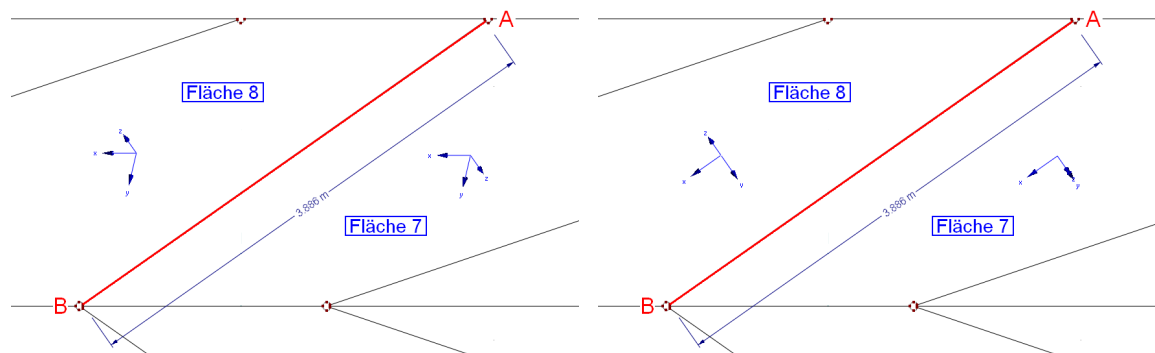


Abb. 7.2: Ursprüngliche Ausrichtung der lokalen Koordinatensysteme (links) und Neuorientierung entlang der Verbindung (rechts)

Richtung B. In Abschnitt 4 wurden die Elementgrößen entlang der Linien mit 3 cm gewählt. Ein einzelner Balken in diesen Schnittkraftverläufen präsentiert daher die Schnittgröße in einem Element der Länge 0,03 m. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg der Schnittgrößen in Richtung des Anfangs- beziehungsweise Endpunktes der Linienverbindung. Diese sind in ihrer Größe den in 4.3.1 beschriebenen Singularitäten, bedingt durch die Strukturgeometrie, zuzuschreiben, sollen jedoch nicht komplett ignoriert werden. Wie diese Werte in der Nachweisführung berücksichtigt werden, wird im späteren Abschnitt 7.3 erläutert.

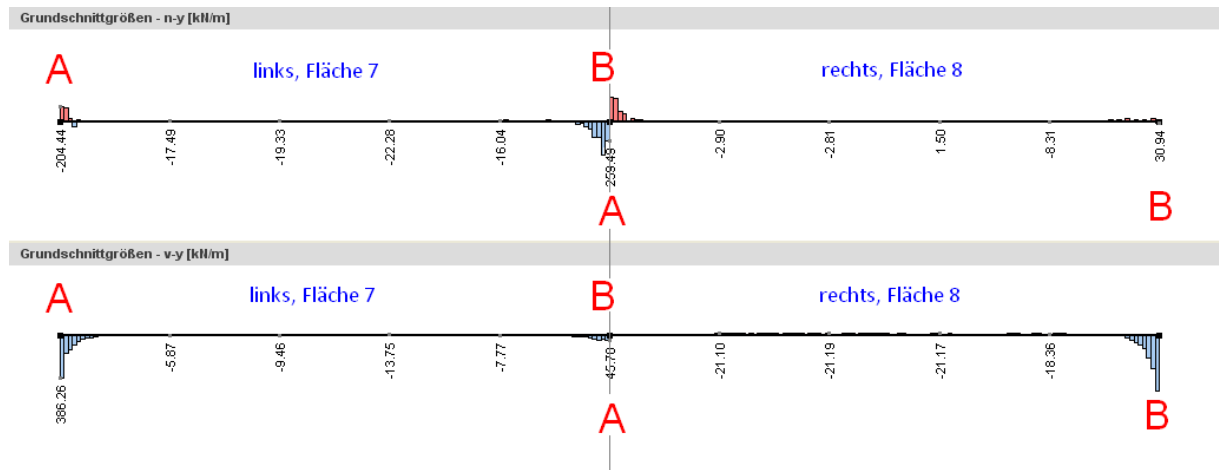


Abb. 7.3: Darstellung der Schnittgrößenverläufe durch RFEM

Aufgrund bekannter statischer Regeln sollten der Schnittkraftverlauf auf der linken Seite dem auf der rechten Seite entsprechen. Dies ist bei der Schubkraft  $n-xy$  und dem Moment  $m-y$  auch der Fall. Der Verlauf unterscheidet sich jedoch bei den dargestellten Schnittgrößen  $n-y$  und  $v-y$ . Die Ursache dafür ist in der Definition der lokalen Koordinatensysteme und der Darstellung der Schnittgrößen zu finden und soll im folgendem Abschnitt erläutert werden.

### 7.1.2 Umrechnung der lokalen Normal- und Querkräfte

In Abbildung 7.1 sind die definierten Schnittgrößen für ein Scheiben-Platten-Element dargestellt. Fügt man an die Verbindungslängsachse  $x$  ein zweites Plattenelement an, so liegen zwar die Verbindungsachse und somit  $n-xy$  und  $m-y$  auf einer Linie, die Normalkraft  $n-y$  und die Querkraft  $v-y$  jedoch wirken auf beiden Seiten in andere Richtungen. Dies wird besonders deutlich, wenn man die Verbindung so betrachtet, dass der Schnitt wie in Abbildung 7.4 in Richtung Verbindungsachse zeigt. Die  $x$ -Achse verläuft parallel zur Verbindungsachse. Die  $z$ -Achse steht orthogonal auf der Fläche. Somit zeigt der Verlauf der Querkraft  $v-y$  in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  in verschiedene Richtungen. Gleiches gilt für die Normalkraft  $n-y$ , die in Richtung der  $y$ -Achse verläuft.

In einer übersichtlichen Darstellung soll dieser Zusammenhang mit Hilfe der Abbildung 7.5 erläutert werden. In der linken Hälfte sind die beiden erwähnten Schnittkräfte bezogen auf die lokalen Achsensysteme der angrenzenden Flächen dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass sowohl  $n-y$  als auch  $v-y$  jeweils in andere Richtungen zeigen. Die Platten sollen unter Gehrung entlang der rot eingezeichneten Linie verbunden werden. Wir benötigen daher jeweils eine Schnittgröße, die senkrecht zu dieser Linie steht, im folgenden als  $N'$  bezeichnet, und eine Querkraft, die parallel



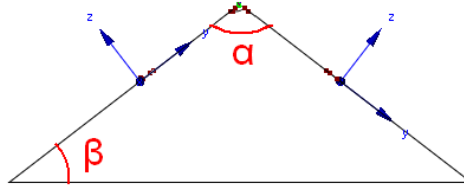


Abb. 7.4: Schnitt in Richtung der Verbindungsachse

dazu verläuft, im folgenden  $V'$ . Dies entspricht den rot eingezeichneten Schnittgrößenvektoren in Abbildung 7.5.

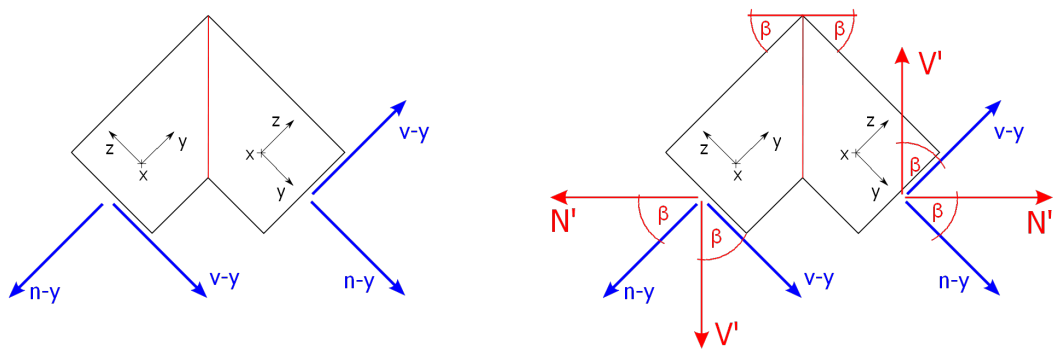


Abb. 7.5: Zusammenführung der beidseitigen Schnittkräfte

Mit Hilfe einfacher trigonometrischer Gleichungen lassen sich die Ausgangsschnittgrößen (blau) in die zur Bemessung erforderlichen Schnittgrößen  $N'$  und  $V'$  (rot) umrechnen. Für die linke Seite in der rechten Abbildung gilt:

$$V'_L = v_{yL} \cdot \cos\beta + n_{yL} \cdot \sin\beta \quad (7.1)$$

$$N'_L = -v_{yL} \cdot \sin\beta + n_{yL} \cdot \cos\beta \quad (7.2)$$

Ebenso lassen sich die Schnittgrößen auf der rechten Seite der Verbindung umrechnen:

$$V'_R = v_{yR} \cdot \cos\beta - n_{yR} \cdot \sin\beta \quad (7.3)$$

$$N'_R = v_{yR} \cdot \sin\beta + n_{yR} \cdot \cos\beta \quad (7.4)$$

Wie bereits erwähnt, müssen die restlichen beiden Schnittgrößen  $n_{xy}$  und  $m_{xy}$  nicht umgerechnet werden, da diese nicht vom Winkel  $\beta$  abhängig sind. Durch die Umformung der Normal- und Querkkräfte sollte der Kurvenverlauf für die Werte links und rechts der Verbindung gleich sein. Nachdem die ursprünglichen Ergebnisverläufe aus RFEM in eine EXCEL-Tabelle exportiert

wurden, können die Werte mit Hilfe der Gleichungen 7.1 bis 7.4 umgerechnet werden. In einem Punkt auf der x-Achse wird der Schnittkraftwert für ein Element angezeigt. Stellt man nun die beiden Verläufe wie in Abbildung 7.6 in einem Diagramm gegenüber, so sieht man, dass die Schnittkräfte  $V'$  und  $N'$  auf beiden Seiten nach der Umrechnung einen annähernd gleichen Verlauf haben. In der linken Hälfte sind die Schnittgrößen für die linke und die rechte Seite der Verbindung gegenüber gestellt, wie sie von RFEM ausgegeben werden. Dies entspricht den blauen Kraftvektoren in Abbildung 7.5. Die großen Werte in den Randbereichen sind in dieser Darstellung abgeschnitten, um den Vorgang der Umrechnung besser darstellen zu können. Wie man sieht bestehen deutliche Unterschiede im Verlauf. Nach der Umrechnung mit den erwähnten Formeln erhalten wir die Schnittkraftverläufe auf der rechten Seite. Die Werte links und rechts der Verbindungslinie haben nun einen annähernd ähnlichen Verlauf.

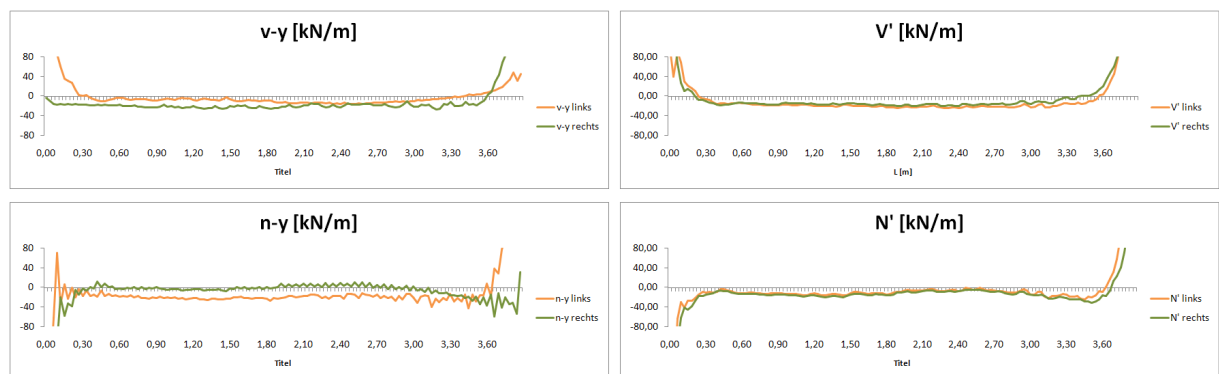


Abb. 7.6: Quer- und Normalkräfte vor (links) und nach der Umrechnung (rechts)

Für die anschließenden Nachweise sollen die jeweils betragsmäßig größeren Werte in einem Punkt verwendet werden, das heißt, es werden die Werte der beiden Kurven verwendet, die jeweils am weitesten von der horizontalen Achse entfernt sind. Beispielhaft sei hier die verwendete Schnittkraftkurve mit den maximalen Betragswerten der Normalkraft  $N'$  in der Abbildung 7.7 dargestellt. Man erhält somit einen einzigen Schnittkraftverlauf, mit dem man die Bemessung der Verbindungen durchführen kann.

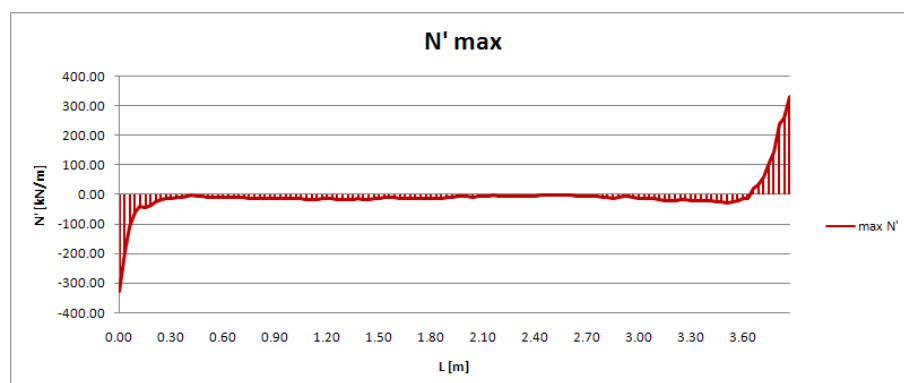


Abb. 7.7: Schnittkraftverlauf für  $N'$  im Beispiel

## 7.2 Verbindungsausführung

Bevor auf die genaue Nachweisführung eingegangen wird, sollen zuerst zwei Vorschläge für die Verbindungsausführung beschrieben werden. VALENTIN BATTISTI führt in seiner Diplomarbeit zum Thema “Faltwerke aus Brettsper Holz” [1] mehrere Vorschläge zur Verbindungsausführung auf. Darunter ist auch die Variante als textile Fuge, die KATHARINA LEITNER in ihrer Dissertation zum Thema “Tragkonstruktionen aus plattenförmigen Holzwerkstoffen mit der Textilen Fuge” [4] ausführlich behandelt hat. Ein Ziel dieser vorliegenden Arbeit ist es unter anderem, die Unterschiede im Tragverhalten und die auftretenden Probleme für die beiden verschiedenen Varianten der Verbindungsausführung, nämlich gelenkig oder steif, herauszuarbeiten. Dies alles soll unter vor dem Hintergrund geschehen, dass die gelenkige Ausbildung der Liniengelenke als favorisierte Variante gilt, da ihre Ausführung deutlich einfacher und somit kostengünstiger als die Ausführung steifer Gelenke erfolgen kann. Als Verbindungsmittel soll bevorzugt auf einfache mechanische Verbindungsmittel zurückgegriffen werden, da andere Verbindungstechniken wie die textile Fuge oder das Verkleben der Platten beziehungsweise Einkleben von Klavierbändern oder Profilblechen nicht auf der Baustelle durchgeführt werden können, und somit durch die Vorfertigung im Werk einen höheren Transportaufwand provozieren.

Die im folgenden vorgeschlagenen Verbindungsausführungen sind demzufolge möglichst einfach konzipiert, mit dem Ziel, zu zeigen, dass auch mit Hilfe einfacher gängiger Verbindungsmittel die Kräfte in einer Tragwerksstruktur, wie sie hier an dem Beispiel der Tennishalle betrachtet wird, übertragen werden können. Eine spezielle Entwicklung tragfähiger Verbindungstypen soll jedoch nicht Teil dieser Arbeit sein, sondern sollte vielmehr Inhalt einer weiteren Forschungsarbeit werden.

Die genaue Vorgehensweise bei der Nachweisführung wird in Abschnitt 7.3.4 beschrieben. Im folgenden sollen die beiden Verbindungstypen erläutert werden.

### 7.2.1 Gelenkige Verbindung

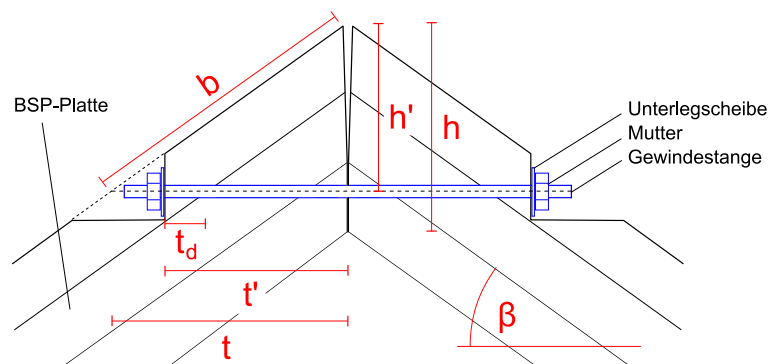


Abb. 7.8: Schnitt durch einen gelenkigen Plattenanschluß

Abbildung 7.8 zeigt eine Ausführung eines gelenkigen Anschlusses zweier Platten über eine Gewindestange, die auf beiden Seiten mit einer Unterlegscheibe und eine Mutter verschraubt wird. Über diese Gewindestange sollen die Querkraft  $V'$  sowie Schubkraft  $n \cdot xy$  in der Verbindungsfuge übertragen werden. Sofern in einem Bereich Zugkräfte übertragen werden müssen, sollen diese

ebenfalls über die Gewindestange aufgenommen werden. In der Unterlegscheibe entsteht in diesem Fall eine Druckkraft, die in die Deckschicht der BSP-Platte eingeleitet werden muss. Drucknormalkräfte werden über die Kontaktfläche in die Platten eingeleitet. Damit von einem gelenkigen Anschluß ausgegangen werden kann, müssen ober- und unterhalb der Gewindestange keilförmige Öffnungen in die Verbindungsfuge angeordnet werden, um eine Rotation um die Längsachse der Linienverbindung zu ermöglichen. Außerdem wird dadurch verhindert, dass im oberen Bereich Druckkräfte eingeleitet werden, die zu Zugspannungen quer zur Faser führen. Der Zugwiderstand von Holz senkrecht zur Faser ist sehr gering und führt schnell zum Versagen. Durch den Schlitz entsteht eine geringere Höhe der Kontaktfläche. Die Gewindestange ist im unteren Drittel der Kontaktfläche angeordnet um eine breitere Fläche zur Übertragung der Querkraftkomponenten zu haben. Auch als Kontaktfläche zur Druckkraftübertragung wird nur die unterste der drei Schichten angesetzt. Dadurch wird die Normalkraft nicht in den Schwerpunkt der Platten sondern exzentrisch eingeleitet. Die Abweichung entspricht einem Drittel der Höhe der Gehrungsfuge  $h'$ . Die zusätzliche Verdrehung um den Schnittpunkt der Fuge mit der Gewindestangenachse dürfte im Vergleich zu den anderen Verdrehungen jedoch sehr gering sein und wird daher vernachlässigt.

### 7.2.2 Steife Verbindung

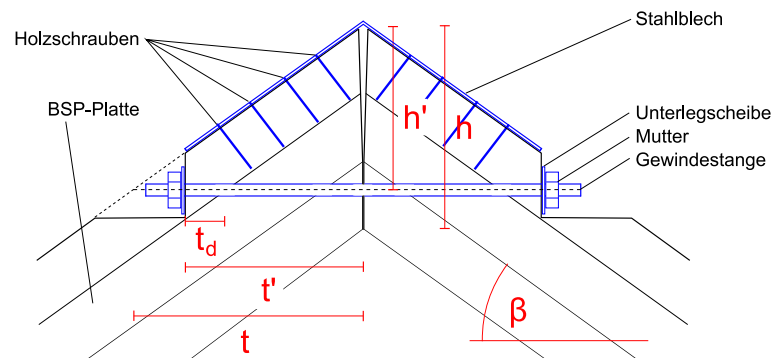


Abb. 7.9: Darstellung einer biegesteifen Plattenverbindung

Die steife Verbindungsausführung ähnelt in ihrem Aufbau dem der gelenkigen Variante. Zur Übertragung des zusätzlichen Momentes wird ein Profilblech aus Stahl über der Spitze der Verbindung hinzugefügt und mit Hilfe von Holzschrauben befestigt. Der keilförmige Schlitz in der Verbindungsfuge wird beibehalten, da Zugspannungen quer zur Faser entstehen würden, sobald in der Kontaktfläche Druck eingeleitet wird. Holz hat jedoch eine sehr geringe Zugfestigkeit quer zur Faser. Somit sind Druckspannungen im oberen Bereich der Verbindungsfuge zu vermeiden.

Das zu übertragende Moment wird im Fall der steifen Verbindungen in ein Kräftepaar aufgeteilt, wobei eine Kraftkomponente  $F_M$  in das Blech eingeleitet werden soll. Die Kraft  $F_M$  in diesem Kräftepaar berechnet sich mit

$$F_M = \frac{M_y}{h'} \quad (7.5)$$

Der gesamte Aufbau der steifen Verbindung ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Je nachdem, ob ein positives oder ein negatives Moment angreift, muss eine zusätzliche Zugkraft in die

Gewindestange eingeleitet oder eine zusätzliche Druckkraft über die Kontaktfläche im Holz übertragen werden. Sofern in dem Profilblech eine Druckkraft eingeleitet wird, muss das Blech mit Hilfe von Holzschrauben gegen Abheben gesichert werden. In diesem Fall ist für den Bereich zwischen dem Profilblechknick und der ersten Befestigungsschraube ein Knicknachweis notwendig. Die Querkraft  $V'$  und die Schubkraft  $N_{xy}$  sollen ausschließlich über die Gewindestange abgetragen werden. Das Profilblech soll bei der Querkraftübertragung nicht beteiligt sein.

### 7.2.3 Allgemeine Geometrische Angaben

Für die Übertragung der Quer- und der Schubkräfte soll die Johanssen-Theorie angewendet werden. Die Anwendung dieser Theorie auf Brettsperrholzplatten wird aktuell noch erforscht und ist noch nicht in einer Norm geregelt. In einer Forschungsarbeit zu diesem Thema an der TU Graz [19] wurden Verfahren zur Bemessung von Verbindungen mit diesem Holzwerkstoff vorgeschlagen. Für die Anwendung dieser Verfahren werden folgende Voraussetzungen festgelegt:

- die Dicken der Decklagen einer Platte sind gleich groß
- die Lochleibungsfestigkeiten der Decklagen einer Platte sind gleich groß
- der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  für die zu verbindenden Holzbauteile ist gleich groß

[19]

Die letzten beiden Bedingungen sind in diesem Fall erfüllt. Soll die erste Bedingung auch als erfüllt gelten, so muss die Höhe  $h'$ , in der die Gewindestange angeordnet wird, so gewählt werden, dass der Bereich, in dem die Gewindestange die innere Deckschicht schneidet, genauso breit ist, wie die verbleibende Dicke der äußeren Deckschicht nach der Versenkung der Unterlegscheibe. Unter der Annahme, dass die Unterlegscheibe bis zur Hälfte der äußeren Deckschicht versenkt wird, ergibt sich die Schichtdicke der inneren sowie der äußeren Deckschicht. In Abhängigkeit vom Winkel  $\beta$  berechnet sich diese mit:

$$t_d = \frac{5cm}{2 \cdot \sin\beta} \quad (7.6)$$

Damit ergibt sich eine verbleibende Höhe  $\Delta h'$ , die zusammen mit den beiden restlichen winkelabhängigen Schichtdicken die erforderliche Höhe der Gewindestangen bildet:

$$\Delta h' = \tan\beta \cdot t_d \quad (7.7)$$

$$h' = 2 \cdot \frac{5cm}{\cos\beta} + \Delta h' \quad (7.8)$$

Eine zweite Konsequenz aus dieser Vorgabe ergibt sich für die Position, an der die erste Gewindestange angebracht werden kann. Betrachtet man die Schnittkante an einem Plattenelement, wie in Abbildung 7.10 geschehen, von oben, so wird deutlich, dass in Bereichen der spitzen Winkel ein Mindestabstand vom Scheitelpunkt eingehalten werden muss, um die Gewindestange

einbringen zu können. Dieser Abstand ist von der Länge des Einflussbereichs der Gewindestange  $t$  abhängig. Der Winkel  $\alpha$  liegt in der Plattenebene. Legt man eine Senkrechte zur Schnittkante in die Plattenoberfläche und lässt diese bis zur äußeren Öffnung für die Gewindestange gehen, so erhält man die Länge  $b$  in Abbildung 7.8, die sich mit Gleichung 7.9 bestimmen lässt. Mit diesem Wert lässt sich über die Winkelbeziehungen mit  $\alpha$  auch der minimale Abstand für die erste Verbindungsstange mit der Gleichung 7.12 bestimmen.

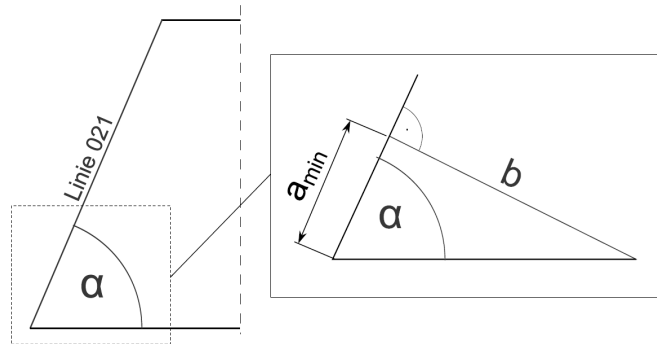


Abb. 7.10: Ermittlung des Mindestabstands der ersten Verbindung

$$b = \frac{t}{\cos\beta} \quad (7.9)$$

$$t = \frac{h'}{\tan\beta} \quad (7.10)$$

$$a_{min} = \frac{b}{\tan\alpha} \quad (7.11)$$

$$a_{min} = \frac{h'}{\tan\alpha \cdot \cos\beta \cdot \tan\beta} \quad (7.12)$$

Die selbe Beschränkung wie für die erste Gewindestange gilt auch für die Anordnung eines Profilbleches für die steife Ausführung der Liniengelenke. Dies soll ebenfalls bis zur Öffnung für die Gewindestange durchgeführt werden, hat also auf der Plattenoberfläche ebenfalls die Länge  $b$ . Somit gilt als Mindestabstand ebenfalls  $a_{min}$ .

Diese geometrischen Vorgaben gelten als primäre Eingangsgrößen und beeinflussen anschließend die maßgebenden Werte der Nachweisführung.

## 7.3 Vorgehensweise bei der Nachweisführung

### 7.3.1 Verwendung der Schnittkraftverläufe

Nachdem die geometrischen Rahmenbedingungen festgelegt wurden, soll nun das Vorgehen beschrieben werden, wie die in den Schnittkraftverläufen dargestellten Kräfte behandelt werden sollen. Bei der Modellierung im Programm wurden die Verbindungen als durchgängig über die

gesamte Länge angenommen. In Wirklichkeit aber müssen die Wechselwirkungen zwischen den Platten an bestimmten Stellen übertragen werden, was durch die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Verbindungsausführungen bedingt ist.

Die Angaben in den Schnittkraftverläufen beziehen sich auf eine Längeneinheit. Die Kräfte werden in kN/m und die Momente in kNm/m angegeben. Jeder einzelne Wert entspricht dabei dem Wert in einem Element. Aufgrund der Einteilung der Elemente entlang der Linie in 3 cm kann jeder dieser Werte durch Multiplikation mit 0,03 m in eine Kraft umgerechnet werden. Die zu übertragende Kraft entspricht dementsprechend der Fläche zwischen der horizontalen Achse und der Schnittkraftkurve, das heißt der Summe aller Einzelkräfte in den Elementen in einem Bereich. Am Beispiel des Schnittkraftverlaufs für die Normalkraft  $N'$  in Abbildung 7.7 soll das einmal verdeutlicht werden.

Am rechten Ende verläuft die Kurve annähernd Dreiecksförmig nach oben bis zu einem Wert von circa 300 kN/m. Die Fläche unterhalb dieses Dreiecks berechnet sich mit Hilfe der Gleichung 7.13 und ergibt eine Kraft von 35,36 kN.

$$A_i = \sum F_i \cdot 0.03m \quad (7.13)$$

Für die Übertragung dieser Kraft müssen nun anschließend die passenden Verbindungsmittel gewählt werden. Das hier beschriebene Vorgehen ist für alle Schnittgrößen gleich. Dadurch wird auch deutlich, wie mit den in Abschnitt 4.3.1 und 7.1.1 erwähnten extrem großen Werten der Schnittgrößen im Randbereich umgegangen werden soll. Diese werden durch das beschriebene Verfahren verschmiert und somit auf der sicheren Seite liegend in die Nachweise mit einbezogen, auch wenn eigentlich eine geringere Belastung zu erwarten ist.

Die Linienverbindung muss also in Bereiche eingeteilt werden, die dann separat betrachtet werden. Vor allem im Randbereich sind dabei die größten Werte zu übertragen. Im ungestörten Abschnitt zwischen Anfangs- und Endbereich treten im Vergleich dazu relativ kleine Schnittgrößen auf. Um die nachfolgenden Nachweise möglichst einfach zu machen, werden die Randwerte auf einen festgelegten Bereich von 0,60 m bezogen, das entspricht der vierfachen Plattendicke. Innerhalb dieses Bereichs können Vorzeichenwechsel auftreten. In diesem Fall wird nur die Summe der maßgebenden betragsmäßig größten Schnittkräfte am Rand in eine Richtung genommen und die innenliegenden, entgegengesetzten, begünstigenden Werte werden in den Nachweisen im weniger belasteten Mittelbereich einbezogen.

### 7.3.2 Verwendung der Johanssen-Theorie

Für die Berechnung der Übertragung der Schubkraft als auch der Querkraft soll die Johanssen-Theorie verwendet werden. Diese basiert auf drei Versagensmechanismen bei auf Abscheren beanspruchten Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Holzbauteile aus Vollholz bestehen oder aus geschichteten Holzwerkstoffen wie zum Beispiel Brettschichtholz, bei denen sich die Faserrichtungen und somit die Lochleibungsfestigkeiten der Einzellagen nicht stark voneinander unterscheiden. Diese Annahme ist bei dem in diesem Fall verwendeten Holzwerkstoff nicht gegeben. Durch die kreuzweise Verleimung der Brettlagen unterscheiden sich die Lochleibungsfestigkeiten zwischen den Einzelschichten stark.

Daraus folgt, dass die drei grundlegenden Versagensmechanismen der Johannsen-Theorie bei einer einschnittigen Verbindung auf 66 theoretisch mögliche Versagensfälle anwachsen [19]. Wie bereits in Abschnitt 7.2.3 erwähnt, gibt es zu dieser Problematik Untersuchungen an der TU Graz [19], in denen unter anderem vier Vorschläge für eine Mittlung der Lochleibungsfestigkeit angegeben werden. Welcher dieser vier Vorschläge zu den geringsten Abweichungen führt, hängt dabei von dem Verhältnis  $\xi = t/d$  der Decklagendicke zur Gesamtdicke ab. In unserem Fall wurde die Gewindestange so angeordnet, dass die Decklagendicke der Verbindung einem Viertel der Gesamtdicke entspricht. In diesem Bereich von  $\xi$  ergeben sich laut Abbildung 3.1 auf Seite 11 des Forschungsberichts [19] die geringsten Abweichungen der Verbindungsfestigkeit, wenn als Lochleibungsfestigkeit der Platte die ungemittelte Lochleibungsfestigkeit der Deckschicht verwendet wird. Bedingung dafür sind verwendete Verbindungsmittelschlankheiten  $\lambda = t/d$ , die größer als 5 sind. Bei geringeren Schlankheiten führt die Verwendung der Lochleibungsfestigkeit der Deckschicht zu Abweichungen von den Messergebnissen von mehr als 10%. Dies ist bei den verwendeten Gewindestangendurchmessern zu überprüfen, andernfalls müssen andere gemittelte Lochleibungsfestigkeiten verwendet werden. Als Ausgangsfestigkeit soll jedoch vorerst die ungemittelte Lochleibungsfestigkeit der Decklage verwendet werden. Diese ist stark vom Einwirkungswinkel der Querkraft abhängig, der vorher ermittelt werden muss. Dieser Vorgang ist sehr umfangreich und soll im folgendem Abschnitt erläutert werden.

### 7.3.3 Winkel zur Faserrichtung der Einzellage

Ein komplexes Problem stellt die Ermittlung des Einwirkungswinkels zur entsprechenden Faser einer bestimmten Schicht in der Brettspertholzplatte dar. Von diesem Winkel hängt die Festigkeit in der Holzlage ab und er beeinflusst dementsprechend entscheidend die Tragfähigkeit der Verbindung. Er ist abhängig von dem bereits erwähnten Schnittwinkel der Kante zur Faser der Deckschicht  $\alpha$  sowie dem Gehrungswinkel  $\beta$ . Der Einwirkungswinkel ist zu ermitteln für die einwirkende Normalkraft  $N'$  sowie für die Querkraft  $V'$  und die Schubkraft  $N_{xy}$ . Die letzten beiden sollen gemeinsam über die Gewindestange übertragen werden. Die Richtung der Resultierende zur Faser ist also wiederum abhängig von einem dritten Winkel  $\gamma$ , der als Einwirkungsrichtung beachtet werden muss. Der resultierende Winkel  $\vartheta$  kann über folgenden Zusammenhang bestimmt werden:

$$\cos\theta = \left\langle \frac{\vec{u}}{\|\vec{u}\|}, \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|} \right\rangle \quad (7.14)$$



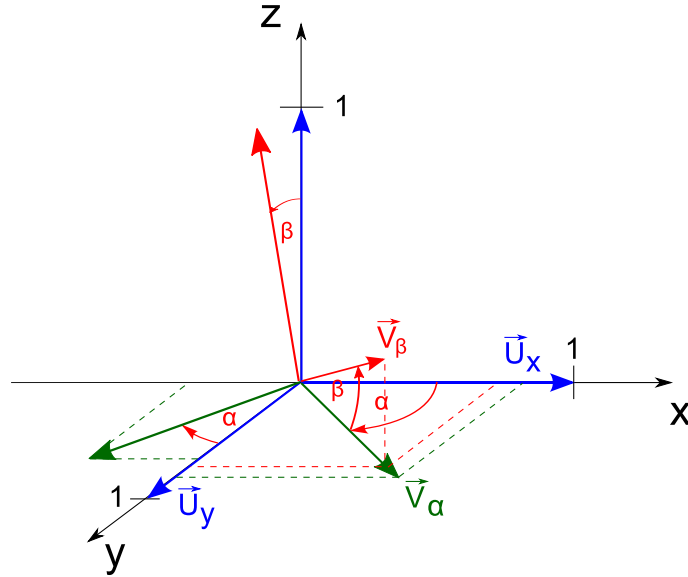


Abb. 7.11: Rotation der Haupttrichtungen um Winkel  $\alpha$  und  $\beta$

Der Kosinus des Winkels zwischen dem Ursprungsvektor  $\vec{u}$  und dem neuen Richtungsvektor  $\vec{v}$  berechnet sich durch das Skalarprodukt der beiden vorher normierten Vektoren. In Abbildung 7.11 soll die Bestimmung der entscheidenden Richtungsfaktoren bildlich dargestellt werden. Ausgangspunkt sind die Achsen  $x$  und  $y$ . Die  $x$ -Achse entspricht dabei der Faserrichtung der Deckschicht und die  $y$ -Achse entspricht der Faserrichtung der Querlage. Auf beiden Achsen soll ein Vektor der Länge "1" liegen. Dies vereinfacht die Bestimmung der neuen Vektorkoordinaten. Sie stellen im folgenden stets den Ursprungsvektor  $\vec{u}$  der Gleichung 7.14 dar. Die erste Rotation bildet die Drehung der Schnittkante um den Winkel  $\alpha$  zur  $x$ -Achse. Die Koordinaten des neuen Vektors sind:

$$\vec{v}_\alpha = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \alpha) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7.15)$$

Als zweite Richtungsänderung soll anschließend der Gehrungswinkel  $\beta$  berücksichtigt werden. Das Ergebnis entspricht der Angriffsrichtung der Normalkraft  $N'$ .

$$\vec{v}_\beta = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) \cdot \cos\beta \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \alpha) \cdot \cos\beta \\ \sin\beta \end{pmatrix} \quad (7.16)$$

Soll nun den Winkel zur Faserrichtung der Deckschicht ermittelt werden, so ist das Skalarprodukt mit dem Einheitsvektor auf der  $x$ -Achse zu bilden. Für den Winkel  $\vartheta_{N,d}$  gilt:

$$\theta_{N,d} = \arccos(\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) \cdot \cos\beta \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \alpha) \cdot \cos\beta \\ \sin\beta \end{pmatrix} \rangle)$$

$$\theta_{N,d} = \arccos(\cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) \cdot \cos\beta) \quad (7.17)$$

Der entsprechende Winkel für die Querlage lässt sich einfach mit der zweiten Zeile des Vektors  $\vec{v}_\beta$  bestimmen:

$$\theta_{N,q} = \arccos(\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha) \cdot \cos\beta) \quad (7.18)$$

Komplizierter wiederum wird es, wenn man den Einwirkungswinkel der resultierenden Querkraft in der Fuge bestimmen will. Diese Phase der Richtungsrechnung wird mit Hilfe der Abbildung 7.12 beschrieben. Dort wird die Umrechnung aus der Abbildung 7.11 weitergeführt. Nach den bisherigen beiden Rotationen lassen sich bereits die beiden Richtungen der Querkraft  $V'$  und der Schubkraft  $N_{xy}$  bestimmen. Die Resultierende  $R$  der beiden Kräfte steht im Winkel  $\gamma$  zur Schubkraft  $N_{xy}$ . Der neue Vektor  $\vec{R}$  soll ebenfalls die Länge "1" haben.

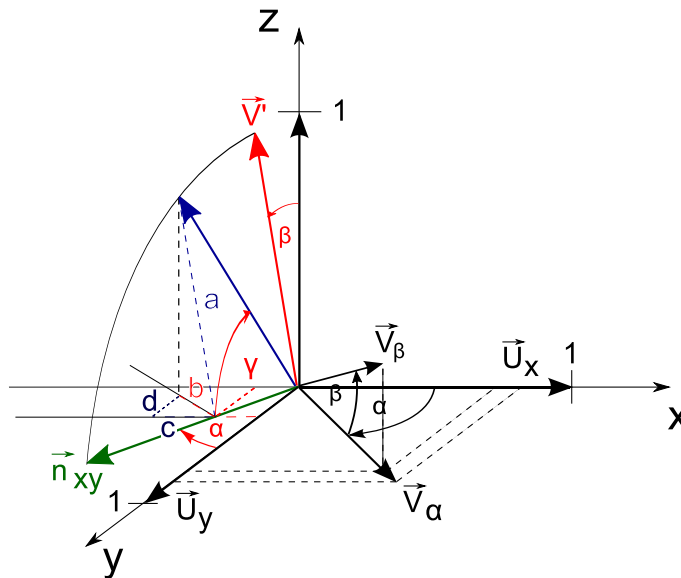


Abb. 7.12: Ermittlung des Angriffswinkels der Querkraftresutierenden R

$$\gamma = \arctan\left(\frac{V'}{n_{xy}}\right) \quad (7.19)$$

Über diesen Winkel läßt sich die Länge der Strecke  $a$  bestimmen, die wiederum in einem Winkel von  $\frac{\pi}{2} - \beta$  zu deren Projektion  $b$  auf der xy-Ebene steht. In dieser Ebene lassen sich die x- und y-Koordinaten des neuen Vektors bestimmen. Die Teilkomponente für die x-Richtung  $c$  schließt mit der Strecke  $b$  den Winkel  $a$  ein. Als letzte Komponente ist nur noch die Strecke  $d$  zu bestimmen, damit der Richtungsvektor für  $R$  zusammengestellt werden kann.

$$b = \sin\gamma \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \beta) \quad ; \quad c = b \cdot \cos\alpha \quad ; \quad d = b \cdot \sin\alpha$$

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) \cdot \cos\gamma - c \\ \sin(\alpha + \frac{\pi}{2}) \cdot \cos\gamma - d \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \beta) \cdot \sin\gamma \end{pmatrix} \quad (7.20)$$

Mit diesem neuen Richtungsvektor läßt sich die Einwirkungsrichtung der resultierenden Querkraft  $R$  und somit die Lochleibungsfestigkeit der einzelnen Schichten bestimmen.

Damit sind alle erforderlichen Einflußgrößen für die Nachweisführung der Verbindung bestimmt.

### 7.3.4 Verwendung der Eingabetabellen

Damit die bisher beschriebenen Berechnungen beschleunigt werden können und nicht jedesmal einzeln wiedergegeben werden müssen, wurden die erwähnten Formeln in EXCEL-Tabellen eingegeben, in denen anschließend nur die betreffenden Kennwerte eingegeben werden müssen. Beispiele aus der späteren Berechnung sind im Anhang C dokumentiert. Dort können Beispiele für die im folgenden allgemein beschriebenen Verfahren betrachtet werden. Alle Felder, in denen bestimmte Werte für die Berechnung eingegeben werden müssen, sind grau markiert. Die anschließenden Rechenprozesse sollen hier allgemein erläutert werden.

#### 7.3.4.1 Übertragung des Biegemoments

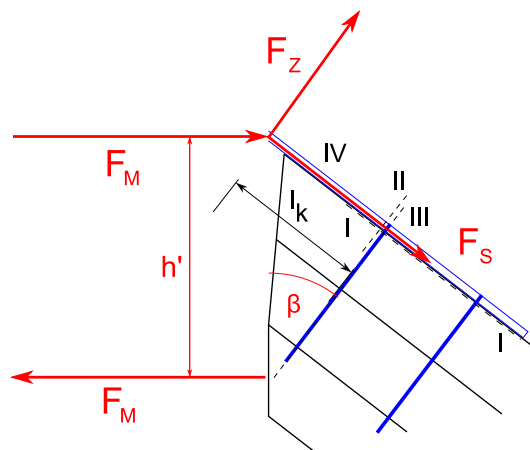


Abb. 7.13: Kräftezerlegung bei Profilblechanschlüssen

Bei der Momentenübertragung werden zwei Fälle unterschieden. Mit der Gleichung 7.5 kann aus dem Moment schnell die Kraft  $F_M$  des entsprechenden Kräftepaars ermittelt werden. Bei positiven Momenten entsteht eine Zugkraft im Profilblech, bei einem negativen Moment entsteht Druck. Eine erste erforderliche Blechdicke ist über die Streckgrenze  $f_{y,d}$  und der Bereichlänge  $l_b$  schnell ermittelt.

$$t_{min} = \frac{F_M}{f_{y,d} \cdot (l_b - a_{min})} \quad (7.21)$$

Die Plattenlänge ist dabei nur in den Randbereichen um  $a_{min}$  zu reduzieren. Kernpunkte dieses Anschlusses sind vielmehr die Befestigung des Profilbleches über Holzschrauben sowie eventuelle Biege- und Knicknachweise. Die ermittelte Kraft  $F_M$  verläuft in der Abbildung 7.13 horizontal, kann aber über den Winkel  $\beta$  in eine Komponente parallel zum Blech und eine Komponente senkrecht dazu zerlegt werden.

$$F_S = F_M \cdot \cos\beta \quad (7.22)$$

$$F_Z = F_M \cdot \sin\beta \quad (7.23)$$

Für den Fall, dass in dem Stahlblech eine Druckkraft eingeleitet wird, sind die Schraubenanschlüsse und das Blech auf die in Abbildung 7.13 dargestellten Problemfälle nachzuweisen.

- Nachweis I: Nachweis auf Abscheren der Schraubenverbindung ( $F_S$ )
- Nachweis II: Biegenachweis des Bleches ( $F_Z$ )
- Nachweis III: Nachweis auf Herausziehen der Holzschrauben ( $F_Z$ )
- Nachweis IV: Knicknachweis des Bleches ( $F_S$  und  $F_Z$ )

Im Fall einer Zugkraft im Blech ist lediglich ein Nachweis auf Abscheren erforderlich.

Eine wichtige Betrachtung ist das Zusammenspiel des angreifenden Biegemoments mit der dazugehörigen Normalkraft  $N'$  in dem betrachteten Bereich. Sollte  $N'$  eine Druckkraft sein, soll die Kraft  $F_M$  aus dem Kräftepaar im Bereich der Kontaktfläche zu dieser hinzuaddiert werden. Je nachdem, ob die Summe eine Druck- oder eine Zugkraft ist, wird sie im ersten Fall komplett über die Kontaktfläche und im zweiten Fall über die Zugstange abgetragen und die Beteiligung des Profilblechs an der Druckkraftübertragung wird vernachlässigt. Ein anderer Ansatz wird gewählt, wenn  $N'$  eine Zugkraft ist. Ein Teil dieser Zugkraft kann dann sowohl vom Profilblech als auch von der Gewindestange aufgenommen werden. Die Aufteilung soll zu gleichen Teilen in die beiden Stahlbauteile erfolgen. Somit muss auf jede Momentenkraftkomponente vor der Nachweisführung jeweils die Hälfte der Normalzugkraft addiert werden. Aus einer Druckkraft im Blech kann somit gegebenenfalls auch eine Zugkraft werden. Das ganze ist in Abbildung 7.14 noch einmal bildlich dargestellt.

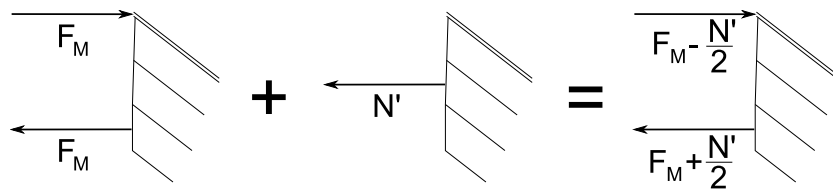


Abb. 7.14: Aufteilung einer Zugkraft auf die beiden Stahlbauteile oben

Sobald dieser Zusammenhang geklärt ist, kann mit dem ersten Nachweis mit der Bezeichnung I begonnen werden. Nach der Kräftezerlegung wird zuerst die notwendige Schraubenanzahl für die Abscherfestigkeit in Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser  $d$  und der Einschraubtiefe  $l$  ermittelt. Für den Verbindungsnachweis wird der in der DIN 1052 [16] erwähnte Fall eines dünnen, außen anliegenden Stahlblechs verwendet. Die Einflussgrößen der Verbindungsfestigkeit für Verbindungen mit Holzschrauben sind die Lochleibungsfestigkeit  $f_{h,k}$  sowie das Fließmoment  $M_{y,k}$  der Holzschraube. Die Lochleibungsfestigkeit ist in diesem Fall nicht vom Einwirkungswinkel der Kraft abhängig.

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot d^{0,3} \quad (7.24)$$

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (7.25)$$

Die Division von  $F_S$  durch den geringeren Festigkeitswert der beiden Versagensfälle aus der Tabelle G.4 in der DIN [16] führt dann zu der erforderlichen Holzschraubenanzahl in dem betrachteten Bereich. Dieser Nachweis ist sowohl bei einer Druck- als auch bei einer Zugkraft im Profilblech zu führen.

Der anschließende Nachweis III der Widerstandsfähigkeit auf Herausziehen ist nur bei einer Druckkraft im Blech notwendig und basiert auf Gleichung (235) der DIN 1052:

$$R_{ax,k} = \min \left\{ \frac{f_{1,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{\sin^2 \alpha + \frac{4}{3} \cdot \cos^2 \alpha} \quad f_{2,k} \cdot d_k^2 \right.$$

Der Nachweis auf Kopfdurchziehen soll hier jedoch nicht berücksichtigt werden, da dieser Versagensfall aufgrund des verwendeten Profilblechs unwahrscheinlich ist. Damit verbleibt für die Berechnung folgende Beziehung:

$$R_{ax,k} = \frac{f_{1,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{\sin^2 \alpha + \frac{4}{3} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (7.26)$$

Die effektive Länge  $l_{ef}$  bezeichnet die Länge der Schraube im Holz. Zu dieser muss anschließend die Dicke des Profilblechs hinzuaddiert werden. Es sollen bevorzugt Holzschrauben der Tragfähigkeitsklasse 3 auf Herausziehen verwendet werden. Beim Nachweis auf Herausziehen ist zu beachten, dass die Schrauben nicht an der selben Stelle wirken, wie die ziehende Kraftkomponente  $F_Z$ . Daher wirken in der Verbindung Hebelwirkungen, die die Belastung auf die Schrauben höher ausfallen lassen, als die eigentliche Kraft. Hiermit wird die Bedingung getroffen, dass zwei Schraubenreihen angeordnet werden und der Abstand der Schraubenreihen zueinander genauso groß sei wie der Abstand der obersten Reihe zur Spitze. Die Hebelgesetze sollen auf die Position der unteren Schraubenreihe bezogen werden. Durch den doppelten Abstand der angreifenden Kraft im Vergleich zur ersten Schraubenreihe verdoppelt sich somit auch die Kraft, die die Schrauben hier aufnehmen müssen. Somit lässt sich bestimmen, wieviel Schrauben in der obersten Reihe eingebaut werden müssen. An diesen Schrauben muss anschließend noch der kombinierte Nachweis durchgeführt werden. Durch den eben beschriebenen Zusammenhang wird die Gleichung (237) der DIN 1052 [16] wie folgt verwendet:

$$\left( \frac{2 \cdot F_Z}{R_{ax,d}} \right)^2 + \left( \frac{F_S}{R_{ra,d}} \right)^2 \leq 1 \quad (7.27)$$

Für die Widerstandsfähigkeiten  $R_{ax,d}$  und  $R_{ra,d}$  werden jeweils die Verbindungsfestigkeiten für eine einzelne gewählte Schraube eingesetzt. Im unteren Teil der Tabelle können noch einmal die Mengen der gewählten Schrauben so variiert werden, dass eine optimale Ausnutzung der Schrauben und gleichzeitig auch eine sinnvolle Verteilung in den beiden Schraubenreihen herauskommt. Die vorher ermittelten erforderlichen Schraubenzahlen sollen dabei lediglich als Orientierung dienen. Die Zugkraftkomponente  $F_Z$  wird in der Gleichung 7.27 durch die Schraubenzahl  $n_1$  der ersten Schraubenreihe dividiert. Die Scherkraftkomponente  $F_S$  wird durch die Gesamtzahl  $n$  dividiert. Das Vorgehen in dem Eingabeformular wird beispielhaft in Tabelle C.11 dargestellt.

Sobald wir die Abmessungen der erforderlichen Schrauben gewählt haben, können in einem zweiten Schritt die Biege- und Knicknachweise durchgeführt werden, da diese beiden Bedingungen vom Abstand der ersten Schraubenreihe von der Profilblechspitze abhängen. Dieser bestimmt sich wiederum dadurch, dass die Schrauben nicht über die Verbindungsfuge hinaus durchgeschraubt werden sollen. Somit muss für diesen Abstand die Bedingung 7.28 erfüllt werden.

$$l_k \geq l_{ef} \cdot \tan \beta \quad (7.28)$$

Über  $l_k$  lässt sich ein Biegemoment bestimmen, das an der Position der oberen Schraubenreihe angreift. Anschließend kann ein klassischer Biegespannungsnachweis durchgeführt werden. Stellt man die Formel 7.30 nach  $t$  um, kann man sich direkt die erforderliche Blechdicke anzeigen lassen.

$$M_F = F_Z \cdot l_k \quad (7.29)$$

$$\frac{M_F}{W} = \frac{6 \cdot M_F}{(l_b - a_{min}) \cdot t^2} \leq f_{y,d} \quad (7.30)$$

$$t \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_F}{(l_b - a_{min}) \cdot f_{y,d}}} \quad (7.31)$$

Der abschließende Knicknachweis soll mit Hilfe der Bemessungshilfen aus den Schneider Bautabellen [13] Abschnitt 8.48 erfolgen. Diese Nachweisführung basiert auf die Eulerschen Knickfälle an balkenförmigen Trägern. Hier ist jedoch ein langgezogenes Blech vorhanden. Bei den Nachweisen auf Plattenbeulen nach DIN 18800 liegen lediglich Spannungszustände in Plattenebene vor, während hier zusätzlich die senkrecht auf der Längsachse wirkende Kraft  $F_Z$  steht. Um diesen ungünstig wirkenden Faktor mit in die Nachweisführung einzubeziehen wird daher das Blech als viele aneinandergereihte Balken betrachtet, auf die die Nachweisführung aus den Schneider Bautabellen [13] angewendet wird. Der Biegeknicksicherheitsnachweis wird hier über folgende Bedingung [13] erfüllt:

$$\frac{N_d}{\kappa \cdot N_{pl,d}} + \frac{\beta_m \cdot M_d}{M_{pl,d}} + \Delta n \leq 1 \quad (7.32)$$

mit:

$$N_{pl,d} = A \cdot f_{yd} = b \cdot t \cdot f_{yd}$$

$$M_{pl,d} = W \cdot f_{yd} = \frac{b \cdot t^2 \cdot f_{yd}}{6}$$

Da Scheiben und Platten in der Regel bei gleicher Bauteildicke in Knickrichtung steifer sind als Balken oder Stützen, kann diese Abgrenzung als konservativer Nachweis betrachtet werden. Der Abminderungsfaktor  $\kappa$  bestimmt sich über den Schlankheitsgrad  $\lambda_k$  mit Hilfe der Tabelle 8.35

aus [13]. Das Blech wird an der ersten Schraubenverbindung als eingespannt und in der Spitze als frei gelagert betrachtet. Dies entspricht nicht den wirklichen Verhältnissen, soll aber als sicherer Ansatz verfolgt werden. Es gilt der erste Eulerknickfall.

$$s_k = 2 \cdot l_k$$

$$\lambda_k = \frac{s_k}{i} = \frac{2 \cdot l_k}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{2 \cdot l_k}{\sqrt{\frac{t^2}{12}}} = \frac{\sqrt{12} \cdot 2 \cdot l_k}{t}$$

$$\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}}$$

Dividiert durch den Bezugsschlankheitsgrad  $\lambda_a$ , der wiederum von der charakteristischen Streckgrenze abhängt, ergibt sich ein bezogener Schlankheitsgrad  $\underline{\lambda}_k$ , mit dem sich aus der Tabelle 8.35 [13] der Abminderungsfaktor  $\chi$  bestimmen lässt. Es wird von einer Knickspannungslinie c ausgegangen, und dass  $\underline{\lambda}_k$  stets größer als 0,2 ist. Somit kann  $\kappa$  berechnet werden mit:

$$k = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (\lambda_k - 0,2) + \lambda_k^2]$$

$$\kappa = \frac{1}{(k + \sqrt{k + \lambda_k^2})}$$

Der Momentenbeiwert  $\beta_m$  bestimmt sich über den Verlauf des Momentes  $M_F$ , mit dem der Biegnachweis durchgeführt wird. Zwar wurde das obere Ende für die Ermittlung des Eulerfalls als frei gelagert betrachtet, in Wahrheit ist es jedoch eingespannt und beim Ausknicken nach oben frei verschieblich. Es wirken dementsprechend am Anfang und am Ende gleich große Momente mit unterschiedlichen Vorzeichen. In Tabelle 8.48 der Bautabellen [13] werden Formeln für die Ermittlung von  $\beta_m$  angegeben. Bei dem hier vorliegenden Fall wird die Gleichung 7.33 verwendet. Das Verhältnis der beiden Endmomente  $\psi$  ist -1. Da der Momentenbeiwert allerdings auf mindestens 0,44 beschränkt ist, wird er bei diesem Wert festgelegt.

$$\beta_{m,\psi} = 0,66 + 0,44 \cdot \psi \quad (7.33)$$

Der Wert  $\Delta n$  kann über eine komplizierte Formel ermittelt oder mit 0,1 festgelegt werden. Letztere Möglichkeit wird hier angewendet. Damit lassen sich alle Gleichungen in das Tabellenblatt eingeben. Als Ergebnis erhält man einen Nachweiswert, der unter 1,0 liegen muss. Ein Beispiel für den Biege- und den Biegeknicknachweis bietet Tabelle C.12 im Anhang C.

Bei einer Zugkraft im Blech sind die Holzschrauben ebenfalls auf Abscheren nachzuweisen. Der Vorgang erfolgt analog zum oben beschriebenen Nachweis und braucht hier nicht weiter erläutert zu werden. Eine Beanspruchung auf Herausziehen, als auch eine Biege- und Biegeknickbeanspruchung liegen in diesem Fall nicht vor.

### 7.3.4.2 Übertragung der Querkraftresultierenden R

In einer weiteren Tabelle wird der Nachweis der Verbindung für die Übertragung der Querkraftresultierenden R durchgeführt. Ein Beispiel zeigt der Anhang C.2. Als erstes müssen die beiden Kraftkomponenten  $V'$  und  $N_{xy}$  sowie die Rohdichte  $\rho_K$  der Deckschicht eingegeben werden. Aus dem Kräftepaar wird zunächst vektoriell die Resultierende R und der Winkel  $\gamma$  zwischen Verbindungslängsachse und R über die folgenden Gleichungen bestimmt:

$$R = \sqrt{V'^2 + N_{xy}^2} \quad (7.34)$$

$$\gamma = \arctan \frac{V'}{N_{xy}} \quad (7.35)$$

Anschließend werden die in Abschnitt 7.3.3 hergeleiteten Gleichungen angewendet und die Einwirkungsrichtung der Resultierenden zur Faserrichtung der Deckschicht bestimmt. Damit ist es nun möglich, einen Verbindungsnachweis nach DIN 1052:2004-08 Abschnitt 12 [16] durchzuführen. In die Berechnung der sechs möglichen Versagensfälle einer einschnittigen Verbindung laut Tabelle G.2 im Anhang G der DIN fließen die Lochleibungsfestigkeit des verwendeten Holzes  $f_{h,\gamma,k}$  sowie das Fließmoment  $M_{y,k}$  ein. Eine Zusammenfassung der Gleichungen (202) bis (204) der DIN ergeben für die Lochleibungsfestigkeit und Gleichung (208) für das Fließmoment in Abhängigkeit vom Winkeldurchmesser d folgende Zusammenhänge:

$$f_{h,\gamma,k} = \frac{0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k}{1,65 \cdot \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma} \quad (7.36)$$

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (7.37)$$

Die Mindestzugfestigkeit  $f_{u,k}$  der Gewindestange wird mit Eingabe der Festigkeitsklasse automatisch angepasst. Die Festigkeit soll bevorzugt der Klasse 4.8 entsprechen. Mit Eingabe des Durchmessers d werden die beiden erwähnten Verbindungsfaktoren berechnet und anschließend in die Gleichungen der Tabelle G.2 aus der DIN eingesetzt. Das Ergebnis sind sechs Verbindungsfestigkeiten, von denen der kleinste Wert als maßgebend verwendet wird. Je nach gewählter Verbindungsmittelanzahl n ergibt sich somit eine totale Verbindungsfestigkeit  $F_{Rd}$ , die größer als die ermittelte Resultierende R sein muss.

### 7.3.4.3 Übertragung der Normalkraft

Für die Übertragung der Normalkraft muss zwischen zwei Fällen, der Übertragung einer Druck- und der Übertragung einer Zugkraft, unterschieden werden. Sofern es sich um eine gelenkige Verbindungsausführung handelt, wird die Normalkraft bei Druck über die Kontaktfläche in der unteren Deckschicht und bei Zug über die Gewindestange übertragen. Bei einer steifen Verbindung kommt zur Normalkraftkomponente  $N'$  noch zusätzlich die Kraft  $F_M$  aus der Zerlegung des Momentes in ein Kräftepaar hinzu.  $N'$  muss am Anfang in die Berechnungstabelle eingegeben werden, während die Momentenkomponente automatisch aus dem Tabellenblatt



für die Momentenzerlegung übernommen wird. Zugkräfte haben ein positives, Druckkräfte ein negatives Vorzeichen. Wie bei der Beschreibung der Momentenübertragung beschrieben, wird eine positive Kraft  $N'$  jeweils zur Hälfte auf das Blech und auf die Gewindestange aufgeteilt. In diesem Fall wird also nur  $N'/2$  auf die Momentenkomponente  $F_M$  addiert. Sofern die Summe der beiden Komponenten eine Druckkraft ergibt, muss diese über die Kontaktfläche übertragen werden. Diese hat die Höhe  $1/3 \cdot h$ . Multipliziert mit der Länge des Bereichs  $l_b$  ergibt das eine Fläche, durch die die zu übertragende Kraft dividiert wird. Die so berechnete Druckspannung  $\sigma_D$  aus Gleichung 7.38 darf die zulässige Druckspannung  $f_{c,\theta,d}$  nach DIN 1052, Abschnitt 10.2.5 unter dem Winkel  $\theta_N$  nicht überschreiten.

$$\sigma_D = \frac{3 \cdot N}{l_b \cdot h} \quad (7.38)$$

$$f_{c,\theta,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \sin^2\theta\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta\right)^2 + \cos^4\theta}} \quad (7.39)$$

Die auftretenden Zugkräfte müssen über die Gewindestange übertragen und auf der Außenseite der Verbindung als Druckkraft in die Decklage der Brettspertholzplatte eingeleitet werden. In einem ersten Schritt wird der erforderliche Durchmesser  $d$  in Abhängigkeit von der Streckgrenze aus Tabelle G.12 in der DIN 1052 [16] ermittelt. Im Regelfall ist dieser Durchmesser deutlich geringer als der bei der Querkraftübertragung benötigte. Vielmehr muss hauptsächlich die Druckkrafteinleitung auf der Außenseite der Verbindung nachgewiesen werden. Diese soll über Unterlegscheiben in die Decklage eingeleitet werden. Angriffswinkel sei auch hier  $\theta_N$ . Somit berechnet sich die Druckfestigkeit wie im Fall Druck mit der Gleichung 7.39. Die Höhe der Unterlegscheibe soll auf maximal 6 cm beschränkt sein. Die beiden Parameter Höhe  $H$  und Breite  $B$  müssen also so aufeinander abgestimmt werden, dass die Fläche der Unterlegscheibe abzüglich der Gewindestangendurchmesser ausreichend groß ist, dass die zulässige Druckspannung unter Winkel  $\theta_N$  nicht überschritten wird. Dabei müssen für den Fall, dass der ermittelte Gewindestangendurchmesser kleiner ist als bei der Querkraftübertragung, die größeren ermittelten Verbindungskennwerte  $n$  und  $d$  aus den beiden Berechnungen eingesetzt werden.

## 7.4 Nachweise einer ausgewählten Verbindung

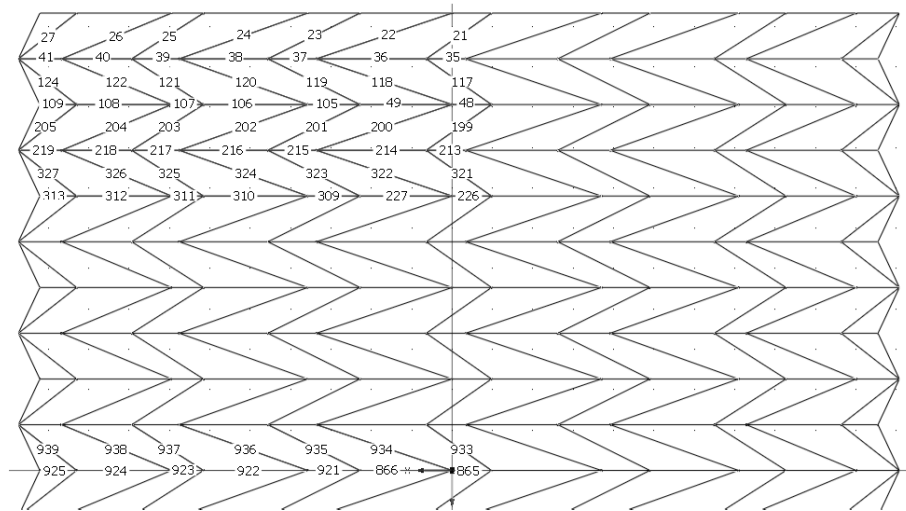


Abb. 7.15: Linienbezeichnungen ausgewählter Bereiche

Im Anhang A sind die berechneten Grundschnittgrößen grafisch einmal für die gelenkigen Anschlüsse und einmal für steife Anschlüsse gegenübergestellt. Aus diesen Abbildungen kann man ablesen, welche Verbindungen besonders stark belastet sind. Im folgenden soll eine Verbindung ausgewählt und mit den im vorigen Abschnitt beschriebenen Prozessen berechnet werden. Eine Übersicht über die verwendeten Linienbezeichnungen liefert die Draufsicht in Abbildung 7.15.

Als erstes werden die Verbindungsmittel bei gelenkiger Verbindung ermittelt. Anschließend wird der Verbindungsnachweis bei der steifen Verbindungsausführung durchgeführt und mit den vorangegangenen Berechnungen verglichen. Zum Schluß werden den beiden Berechnungen die Schnittgrößenverläufe aus dem mittleren Bereich gegenübergestellt.

Als Verbindung soll das bereits gewählte Beispiel der Verbindungslinie 021 gewählt werden. Diese liegt, wie bereits erwähnt, im ungestützten Randbereich im Firstpunkt des Bogens und hat eine Gesamtlänge von 3,89 m. Der Schnittwinkel zur Faserlängsrichtung der Decklage  $\alpha$  beträgt  $42,3^\circ$ , der Gehrungswinkel der Schnittkante  $\beta$   $37,7^\circ$ . Als erstes müssen die geometrischen Eingangsgrößen mit Hilfe der Formeln aus den vorigen Kapiteln ermittelt werden. Die Tabelle C.1 im Anhang C.1 liefert die Gesamthöhe der Schnittfläche  $h$ , den Abstand der Gewindestange zur Verbindungsspitze sowie die Wirkungslänge der Gewindestange  $t'$  und den Mindestabstand des ersten Verbindungsmittels  $a_{\min}$ . Die Ergebnisse seien in Tabelle 7.1 noch einmal dargestellt.

Tab. 7.1: Geometrische Ausgangsgrößen der Verbindung Linie 021

$\alpha$	$\beta$	$h$	$h'$	$t'$	$a_{\min}$
$42,3^\circ$	$37,7^\circ$	18,96 cm	15,80 cm	16,35 cm	28 cm

### 7.4.1 gelenkig

Die Schnittgrößenverläufe sind im Anhang C.1.1 abgebildet. Die Verbindung wird in drei Bereiche eingeteilt. Am Anfang und am Ende soll die Überlagerung auf einer Länge von 0,6 m stattfinden.

Die verbleibenden Werte zwischen diesen beiden Randbereichen können ebenfalls zu einer Gesamtkraft zusammengefasst werden. In den Randbereichen befinden sich die betragsgrößten Schnittkräfte. Sollte der Schnittkraftverlauf in diesem Bereich das Vorzeichen wechseln, so werden lediglich die äußersten Werte zu einer Kraft zusammengefasst. Die restlichen Werte werden mit auf die Schnittgröße im mittleren Bereich aufgeschlagen. Tabelle 7.2 fasst die auftretenden Schnittgrößen in den drei Bereichen zusammen.

Tab. 7.2: Zusammenfassung der Schnittgrößen aus den Schnittgrößenverläufen im Anhang C.1.1 für gelenkige Anschlüsse

	Bereich A <sub>1</sub>	Bereich A <sub>2</sub>	Bereich A <sub>3</sub>
	0 - 0,60 m	0,06 m - 3,29 m	3,29 m - 3,89 m
Querkraft V' [kN]	17,02	62,34	37,38
Schubkraft N <sub>xy</sub> [kN]	57,64	38,11	40,28
<b>Resultierende R [kN]</b>	<b>60,10</b>	<b>66,51</b>	<b>54,95</b>
<b>Normalkraft N' [kN]</b>	<b>-30,06</b>	<b>-43,41</b>	<b>35,36</b>

#### 7.4.1.1 Bereich A<sub>1</sub>

**Querkraft R** Der erste Nachweis soll anhand der Querkraftresultierenden R durchgeführt werden. Es ist eine Resultierende von 60,10 kN zu übertragen. Die Eingabe der Eingangswerte in die Tabelle C.2 führt zu dem Einwirkungswinkel  $\vartheta_R$  und im Anschluß zu der erforderlichen Verbindungsmittelzahl. Demnach sind drei Gewindestangen mit einem Durchmesser von 28 mm der Festigkeitsklasse 4.8 notwendig.

**Normalkraft N'** Auf 0,60 m schließt hier die Schnittkraftkurve eine Druckkraft von 30,06 kN ein. Im Falle einer Druckkraft muss lediglich die Druckfestigkeit der untersten Deckschicht unter dem betreffenden Einwirkungswinkel nachgewiesen werden. Dies geschieht in Tabelle C.5. Der erforderliche Nachweis der Druckfestigkeit unter dem nach Abschnitt 7.3.3 ermittelten Winkel wird ausreichend erfüllt.

#### 7.4.1.2 Bereich A<sub>2</sub>

**Querkraft R'** Zwischen den beiden Randbereichen ist auf 2,70 m Länge eine Querkraftresultierende R' von 66,51 kN zu übertragen. Um eine gleichmäßige Verteilung der Gewindestangen zu erreichen, werden mehrere kleinere Durchmesser verwendet. Will man eine Verbindung circa alle 50 cm erreichen, müssen sechs Gewindestangen angeordnet werden. Eine optimale Ausnutzung von 96% wird erreicht, wenn sechs Gewindestangen mit einem Durchmesser von 18 cm und einer Festigkeitsklasse von 5.8 angeordnet werden. Hiermit können 69,10 kN übertragen werden.

**Normalkraft N'** Im Bereich A<sub>2</sub> zwischen den beiden Rändern verläuft die Schnittkraftkurve relativ gleichmäßig. Aus den letzten 60 cm des Bereichs A<sub>3</sub> kommen noch die verbleibenden Druckkraft vor dem Vorzeichenwechsel mit hinzu. Zusammen ergibt das eine Druckkraft von 43,41

kN auf einer Länge von 2,70 m. Der Nachweis der Druckspannung ist in Tabelle C.6 ausreichend erfüllt.

#### 7.4.1.3 Bereich A<sub>3</sub>

**Querkraft R** Das Vorzeichen der Querkraft wechselt wieder innerhalb des festgelegten Bereichs von 0,6 m. Im Bereich zwischen 3,54 m und 3,90 m schließt die Verlaufskurve eine Kraft von 37,38 kN ein. Bei  $N_{xy}$  werden auf den letzten 0,51 m 40,28 kN eingeschlossen. Die Eingabe dieser Werte in die Berechnungstabelle C.4 ergibt hier als Resultierende R 54,95 kN und im folgenden drei Gewindestangen mit einem Durchmesser von 24 mm bei einer Festigkeitsklasse von 5.8 als optimale Verbindung. Diese würde zu 97% ausgenutzt werden, während eine Verbindung mit drei Gewindestangen à 28 mm bei der nächstniedrigen Festigkeitsklasse 4.8 ganze 65,31 kN übertragen könnte und somit nur mit 84% ausgenutzt wäre.

**Normalkraft N'** Im Bereich A<sub>3</sub> entsteht auf den letzten 21 cm laut Schnittkraftverlauf eine Zugkraft von 35,36 kN, die über eine Zugstange übertragen werden muss. Da aufgrund der geometrischen Vorgaben wie beschrieben die erste Gewindestange erst nach 28 cm angebracht werden kann, muss diese Kraft eingerückt werden. Die letzten 60 cm am Rand werden weiter als komplett separater Bereich betrachtet. Für die Übertragung der Zugkraft von 35,36 kN ist laut Tabelle C.7 lediglich eine Gewindestange von 14 mm Durchmesser notwendig. Bei den Nachweisen für die Querkraftübertragung wurden dagegen drei Stangen mit einem Durchmesser von 24 mm und höherer Festigkeitsklasse angeordnet. Dies unterstreicht die Annahme, dass vor allem die Krafteinleitung in die äußere Decklage mit Hilfe von Unterlegscheiben problematisch wird. Die Druckfestigkeit muss wieder unter dem Einfluss des Einwirkungswinkels abgemindert werden. In diesem Fall kann diese Druckkraft nicht im Bereich einer einzelnen Stange übertragen werden. Verwendet man dagegen eine rechteckige Unterlegscheibe, die an den beiden äußeren Gewindestangen angebracht wird, so lässt sich die Druckkraft einleiten. Zieht man also die Öffnungen der beiden Stangen von der Fläche ab, so ergeben sich als erforderliche Abmessungen der Platte eine Höhe von 5,5 cm und eine Länge von 45 cm.

#### 7.4.1.4 Verbindungsmittelabstände

Damit sind nun die erforderlichen Verbindungsparameter bestimmt. Es muss noch die Anordnung der Gewindestangen bestimmt werden. Dabei sind gewisse Abstände einzuhalten. Dafür sind in einem Forschungsbericht der Universität Karlsruhe mit dem Titel "Stiftförmige Verbindungsmittel in Brettsperrholz" [20] Vorschläge gemacht worden, die in Tabelle 7.3 dargestellt sind.

Tab. 7.3: Mindestabstände für Stabdübel in Brettspertholz nach [20]

	1	2
$a_1$	parallel zur Faserrichtung (DS)	$(3 + \cos\alpha) \cdot d$
$a_2$	rechtwinklig zur Faserrichtung (DS)	$3 \cdot d$
$a_{1,t}$	beanspruchtes Plattenende	$5 \cdot d$
$a_{1,c}$	unbeanspruchtes Plattenende	$4 \cdot d \cdot \sin\alpha$ (mind. $3 \cdot d$ )
$a_{2,t}$	beanspruchter Rand	$3 \cdot d$
$a_{2,c}$	unbeanspruchter Rand	$3 \cdot d$
$\alpha$ ist der Winkel zwischen der Kraft und der Faserrichtung der Deckschicht		

Die Gewindestangen werden in einer Reihe angeordnet. Der Mindestabstand vom Rand  $a_{1,t}$  sollte durch die geometrische Bedingung für  $a_{\min}$  ausreichend eingehalten sein. Desweiteren muss der Abstand  $a_1$  der Stangen untereinander in der Reihe betrachtet werden. Dabei wird von dem ungünstigsten Fall für  $\alpha = 0$  ausgegangen. Somit haben wir die beiden Bedingungen  $5 \cdot d$  für den Abstand vom Rand und  $4 \cdot d$  für den Abstand untereinander einzuhalten.

Im ersten Bereich müssen auf 60 cm drei Stabdübel der Größe 28 mm angeordnet werden. Eine günstige Verteilung entsteht bei 140 mm Abstand zwischen den Gewindestangen.

$$a_{1,t} = 5 \cdot d = 5 \cdot 28\text{mm} = 140\text{mm} \leq a_{\min} = 280\text{mm}$$

$$a_1 = 4 \cdot d = 4 \cdot 28\text{mm} = 112\text{mm} \leq 140\text{mm}$$

$$600\text{mm} - a_{1,t} - a_1 = 600\text{mm} - 280\text{mm} - 2 \cdot 140\text{mm} = 40\text{mm}$$

Im Bereich  $A_3$  gelten die gleichen Bedingungen. Hier sollen drei Gewindestangen mit einem Durchmesser von 24 mm angeordnet werden.

$$a_{1,t} = 5 \cdot d = 5 \cdot 24\text{mm} = 120\text{mm} \leq a_{\min} = 280\text{mm}$$

$$a_1 = 4 \cdot d = 4 \cdot 24\text{mm} = 96\text{mm} \leq 140\text{mm}$$

$$600\text{mm} - a_{1,t} - a_1 = 600\text{mm} - 280\text{mm} - 2 \cdot 140\text{mm} = 40\text{mm}$$

Der Mindestabstand der Gewindestangen im Mittelbereich braucht nicht überprüft zu werden. Sie sollen lediglich im gleichen Abstand zueinander liegen. Zwischen den beiden inneren Gewindestangen der Randbereiche verbleibt eine Länge von  $270\text{cm} + 2 \cdot 4\text{cm} = 278\text{cm}$ . In diese kommen die sechs Gewindestangen mit einem Durchmesser von 18 mm in einen Abstand von 40 cm.

Die Anordnung der Gewindestangen über die gesamte Länge ist in Abbildung 7.16 dargestellt.

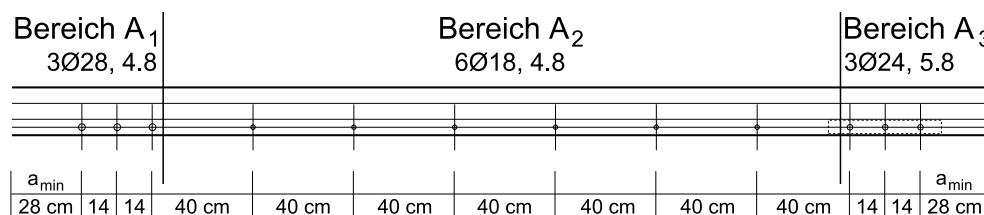


Abb. 7.16: Anordnung der Gewindestangen in Linienverbindung 021 bei gelenkiger Ausführung

## 7.4.2 steif

Die Abbildungen in Anhang C.2.1 zeigen die Schnittgrößenverläufe für die Berechnung mit steifen Verbindungen. Zu den drei vorherigen Schnittgrößen kommt hier noch ein zusätzliches Moment  $M_y$  hinzu. Dieses ist über die gesamte Länge der Verbindung negativ, das heißt, dass überall eine Druckkraft in das zusätzliche Blech eingeleitet wird. Es wird ebenfalls in die drei Bereiche eingeteilt. Die Normalkraft  $N'$  und das Moment  $M_y$  wirken bei der Bemessung zusammen. Die Tabelle 7.4 fasst zuerst die auftretenden Schnittgrößen in den drei Bereichen zusammen.

Tab. 7.4: Zusammenfassung der Schnittgrößen aus den Schnittgrößenverläufen für steife Anschlüsse

	Bereich A <sub>1</sub>	Bereich A <sub>2</sub>	Bereich A <sub>3</sub>
	0 - 0,60 m	0,06 m - 3,29 m	3,29 m - 3,89 m
Querkraft V' [kN]	12,19	31,57	12,73
Schubkraft $n_{xy}$ [kN]	10,43	68,79	30,36
<b>Resultierende R [kN]</b>	<b>16,04</b>	<b>75,69</b>	<b>32,92</b>
Normalkraft N' [kN]	-12,94	-51,83	20,89
Moment $M_y$ [kNm]	-2,64	-23,95	-5,18

### 7.4.2.1 Bereich A<sub>1</sub>

**Querkraftresultierende R** Im ersten Bereich A<sub>1</sub> sammelt sich eine Querkraft V' von 12,19 kN und eine Schubkraft  $N_{xy}$  von 10,43 kN an. Zur Übertragung der Resultierenden R von 16,04 kN reichen laut Tabelle C.8 zwei Gewindestangen mit einem Durchmesser von 18 mm der kleinsten Festigkeitsklasse 4.8.

**Linienmoment  $M_y$  und Normalkraft N'** Das Linienmoment und die Normalkraft müssen gemeinsam betrachtet werden. Das Moment von -2,64 kNm wird mit der Gleichung 7.5 in ein Kräftepaar umgerechnet. Es entsteht eine Druckkraft im Blech und eine Zugkraft in der Gewindestange.

$$F_M = \frac{M_y}{h'} = \frac{-2,64 \text{ kNm}}{0,158 \text{ m}} = -16,71 \text{ kN}$$

Die zugehörige Normalkraft  $N'$  in diesem Bereich ist eine Druckkraft von 12,94 kN, die nicht mit in dem Blech aufgenommen werden soll. Die Summe aus Normalkraft  $N'$  und der Momentenkomponente  $F_M$  im Bereich der Kontaktfläche der Brettsperrholzplatten ergibt eine Zugkraft von 3,77 kN. Für deren Übertragung reicht eine Gewindestange mit 5 mm Durchmesser. Für die Querkraftübertragung werden zwei Stangen à 18 mm benötigt. Bei der Krafteinleitung in die äußere Deckschicht kann eine runde Unterlegscheibe mit 60 mm verwendet werden. Der Nachweis der Normalkraft in der Brettsperrholzplatte ist im Tabellenblatt C.5 dokumentiert.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (60\text{mm})^2}{4} = 2827\text{mm}^2$$

$$\frac{N}{A} = \frac{3770\text{N}}{2827\text{mm}^2} = 1,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq f_{c,\theta,d} = 1,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Nachweise für das Stahlblech sind in den Tabellen C.11 und C.12 zu sehen. Der Nachweis der Blechdicke über die zulässige Druckspannung mit der Gleichung 7.21 führt zu einer erforderlichen Blechdicke von 0,22 mm bei Verwendung eines S235. Dies würde ein sehr dünnes Blech bedeuten. Bevor der Knicknachweis durchgeführt werden kann, müssen die Anzahl und die Abmessungen der Holzschrauben bestimmt werden. Dafür wurde wie beschrieben ein Formblatt angelegt, mit dem die erforderlichen Parameter ermittelt werden können. Das Ergebnis für den hier vorliegenden Fall ist in Tabelle C.11 dargestellt. In diesem wird wie beschrieben sowohl der Nachweis auf Abscheren als auch der Nachweis auf Herausziehen durchgeführt. Mit zehn Holzschrauben mit einem Durchmesser von 7 mm und einer Länge von 80 mm lassen sich die beiden Komponenten  $F_Z$  und  $F_S$  der Kraft  $F_M$  übertragen. Auch der kombinierte Nachweis in der ersten Schraubenreihe wird auf diese Weise erfüllt, wenn sechs der zehn Schrauben dort angeordnet werden. Die Mindestabstände der Schrauben sind in Tabelle 10 der DIN 1052 [16] angegeben. Die Löcher sollen vorgebohrt werden. Die Kraftrichtung steht im Winkel  $\alpha$  zur Faserrichtung, die Schrauben werden jedoch nicht in Faserrichtung angeordnet. Daher wird vereinfachend der ungünstigste Fall für die Abstände untereinander angenommen. Vom Rand ist ein Abstand von mindestens dem siebenfachen des Durchmessers zu wählen.

$$a_1 = a_2 = (3 + 2 \cdot \cos\alpha) \cdot d = 5 \cdot d = 5 \cdot 7 = 35\text{mm}$$

$$a_{1,c} = 7 \cdot d = 7 \cdot 7\text{mm} = 49\text{mm}$$

Der Abstand der ersten Schraubenreihe wird auch von der Länge der Schrauben begrenzt. Mit der Gleichung 7.28 erhält man einen Mindestabstand der Schrauben von 66 mm. Es wird im folgenden ein Abstand für die erste Schraubenreihe und für die Schrauben untereinander von 70 mm gewählt.

In der zweiten Bemessungstabelle C.12 können mit diesem Abstand nun die beiden verbleibenden Biege- und Knicknachweise durchgeführt werden. Die Schraubenlänge wurde etwas länger gewählt als in Tabelle C.11, um die Blechdicke zu berücksichtigen. Im ersten Teil wird mit der Gleichung 7.31 eine erforderliche Blechdicke von 6,18 mm mit einem S355 ermittelt. Mit einer

gewählten Blechdicke von 6,5 mm wird der anschließende Knicknachweis nach Abschnitt 7.3.4.1 ausreichend erfüllt.

Die Anordnung der Holzschrauben ist in Abbildung 7.17 abgebildet. Da auch für das Stahlblech die Bedingungen für  $a_{\min}$  gelten, stehen hier nicht die gesamten 60 cm für die Verteilung zur Verfügung.

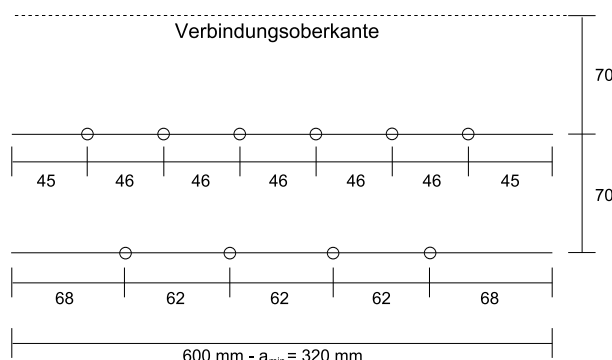


Abb. 7.17: Anordnung der Holzschrauben in Bereich  $A_1$

#### 7.4.2.2 Bereich $A_2$

**Querkraftresultierende  $R$**  Auf den Abschnitt zwischen den beiden Randbereich entfallen 12,73 kN für die Querkraft und 30,36 kN bei der Schubkraft. In den letzten Wert kommen auch noch die Werte nach dem Vorzeichenwechsel in Bereich  $A_1$  hinein. Es reichen nach Tabelle C.9 sechs Gewindestangen mit einem Durchmesser von 14 mm und einer Festigkeitsklasse 4.8.

**Linienmoment  $M_y$  und Normalkraft  $N'$**  Auf den mittleren 2,70 m summieren sich die Momente zu -23,95 kNm. Über die gesamte Strecke verläuft eine Gesamtdruckkraft  $N'$  von 51,83 kN, die komplett in die Brettspertholzplatte eingeht. Das zum Moment passende Kräftepaar setzt sich aus zwei Kräften mit je 151,60 kN oder 56,15 kN/m zusammen. In das Blech geht eine Druckkraft und in die Holzplatte eine Zugkraft. Die Nachweistabelle C.17 zeigt, dass hier 80 Schrauben der Länge 75 mm und Durchmesser 8 mm notwendig sind, um das Blech auf Abscheren und Herausziehen zu sichern. Von denen sollen 50 in der obersten Reihe angeordnet werden. Auf einer Länge von 2700 mm ergibt das eine Schraube alle 52 mm. Die Anordnung der Schrauben wird hier nicht explizit dargestellt.

Bei Verwendung 85 mm langer Schrauben hat die erste Schraubenreihe einen Mindestabstand von 66 mm vom oberen Stahlblechrand. Bei einem gewählten Abstand von 70 mm wird ein Stahlblech der Stahlgüte S355 mit einer Dicke von 6,5 mm benötigt, das wiederum den Biegeknicknachweis ausreichend erfüllt, wie Tabelle C.18 zeigt.

Bleibt als letztes noch die Normalkraft nachzuweisen. Die Summe der Momentenkomponente  $F_M$  und der Normalkraft  $N'$  ergibt eine Zugkraft von 99,77 kN oder 36,95 kN/m. Zur Querkraftübertragung werden in diesem Bereich sechs Gewindestangen mit 14 mm Durchmesser benötigt. Wenn unter die Muttern für je zwei von ihnen eine rechteckige Platte mit den Abmessungen 500x45 mm angeordnet wird, kann die Druckkraft entsprechend eingeleitet werden. Die Nachweistabelle C.19 zeigt die entsprechenden Ergebnisse.



### 7.4.2.3 Bereich A<sub>3</sub>

**Querkraftresultierende R** Im Endbereich A<sub>3</sub> ist eine Querkraft V' von 31,57 kN zusammen mit einer Schubkomponente N<sub>xy</sub> von 68,79 kN zu übertragen. Hier müssen also deutlich größere Gewindestangen angeordnet werden, um die Resultierende mit 75,69 kN übertragen zu können. Drei Gewindestangen mit einem Durchmesser von 32 mm und der Festigkeitsklasse 4.8 sind hier notwendig, wie Tabelle C.10 zeigt.

**Linienmoment M<sub>y</sub> und Normalkraft N'** In diesem Bereich beträgt die Summe der Momente in den Elementen -5,18 kNm. Die horizontale Druckkraft im Blech beträgt demnach -32,79 kN. Die Normalkraft N' in diesem Bereich ist eine Zugkraft von 20,89 kN. Die Zugkraft geht je zur Hälfte in das Blech und in die Gewindestange ein. In Tabelle C.14 wird die Hälfte dieser Kraft mit 10,45 kN auf die Druckkraft in dem Blech aus dem Momentenkraftpaar hinzuaddiert. Die Summe bleibt eine Druckkraft von -22,34 kN und wird jeweils in eine parallele und eine senkrechte Komponente zum Blech zerlegt und die beiden Nachweise auf Abscheren und Herausziehen durchgeführt. Hier werden 12 Holzschrauben der Festigkeitsklasse 4.8 mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Länge von 75 mm benötigt. Davon müssen 9 Schrauben in der ersten Schraubenreihe angeordnet werden, um den kombinierten Nachweis zu erfüllen. Die Mindestabstände müssen dieselben Bedingungen wie in Bereich A<sub>1</sub> erfüllen.

$$a_1 = a_2 = (3 + 2 \cdot \cos\alpha) \cdot d = 5 \cdot d = 5 \cdot 8 = 40\text{mm}$$

$$a_{1,c} = 7 \cdot d = 7 \cdot 8\text{mm} = 56\text{mm}$$

Damit die Schrauben jedoch nicht über die Verbindungsfuge hinausgehen, muss zusätzlich die Bedingung 7.28 erfüllt werden.

$$l_{k \geq l_{ef}} \cdot \tan\beta = 85 \cdot \tan\beta = 66\text{mm}$$

Die erste Schraubenreihe kann also erst im Abstand von 70 mm vom Blechknick angeordnet werden. Der Biegenachweis für ein Blech der Stahlgüte S355 an der Stelle, wo die erste Schraubenreihe liegt, liefert eine erforderliche Blechdicke von 7,15 mm. Bei einer Stahlblechdicke von 7,5 mm wird auch der Biegeknicknachweis ausreichend erfüllt.

Die zum Drehmoment gehörende Zugkomponente F<sub>M</sub> in der unteren Decklage der Holzplatte muss mit der Hälfte der Normalkraftkomponente N' in diesem Bereich addiert werden. Die Summe ergibt eine Zugkraft von 43,24 kN. Wie in den vorigen Beispielen ist die erforderliche Gewindestangendicke hier deutlich geringer als bei der Querkraftübertragung. Es werden drei Gewindestangen mit einem Durchmesser von 32 mm verwendet. Somit ist für die Druckkrafteinleitung in die äußere Deckschicht eine Unterlegscheibe im Format 500 x 60 mm erforderlich, wie Tabelle C.16 zeigt.

Die Abbildung 7.19 zeigt zusammenfassend die Anordnung der Gewindestangen über die gesamte Länge der Verbindung. Es gelten die selben Bedingungen für die Abstände wie bei der gelenkigen

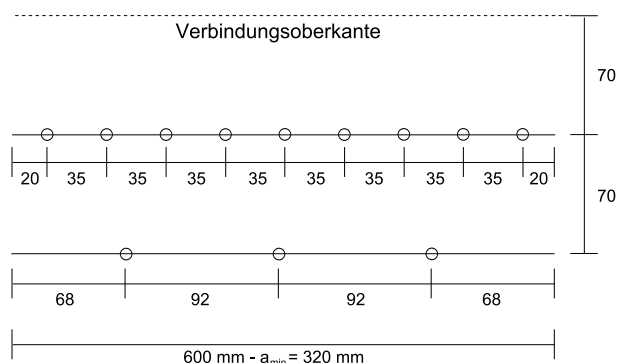


Abb. 7.18: Anordnung der Holzschrauben in Bereich  $A_3$

Verbindung. Der Abstand untereinander soll bei drei Gewindestangen im Randbereich 140 mm betragen, um eine gleichmäßige Verteilung zu erzielen. Der größte verwendete Gewindestangendurchmesser beträgt 32 mm. Der minimale Abstand soll  $4 \cdot d = 4 \cdot 32 \text{ mm} = 128 \text{ mm}$  betragen und liegt somit unter den gewählten 140 mm.

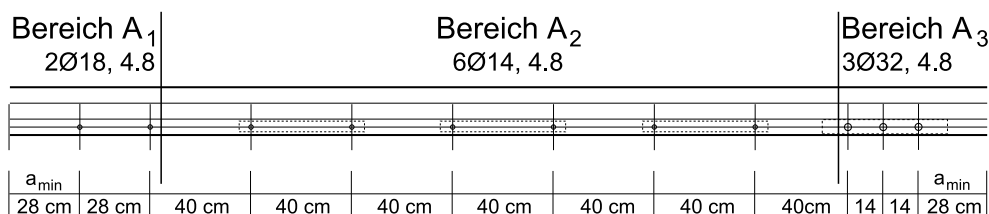


Abb. 7.19: Anordnung der Gewindestangen in Linienverbindung 021 bei steifer Ausführung

### 7.4.3 Vergleich mit Verbindung aus dem Zentrum

Hier soll ein Vergleich zwischen den Schnittgrößen der Verbindung am Rand und den Schnittgrößen aus dem Zentrum des Sturktur erfolgen. Auf einen expliziten Nachweis der Vergleichsverbindung wird verzichtet. Die Verbindungslinie aus der Mitte der Sturktur hat die Bezeichnung 933. Diese liegt ebenfalls im First an gleicher Position und hat die gleiche Länge wie Linie 021. Die Schnittkraftverläufe über die gesamte Länge der Verbindung werden in einem Diagramm graphisch gegenübergestellt. Begonnen werden soll mit den Schnittgrößen  $N'$ ,  $V'$  und  $N_{xy}$  bei gelenkigen Verbindungen.

#### 7.4.3.1 gelenkig

Die Schnittgrößenvergleiche in Anhang C.3.1 zeigen, dass im Mittelbereich der Verbindungen die Beanspruchungen im Zentrum der Struktur durchaus geringer ausfallen als am Rand in Linie 021. Dies trifft jedoch nicht auf die Randbereiche zu. Bei den Schubspannungen liegen die Werte der Linie 933 im Rand über denen bei der Linie 021. Die Schnittkraftkurven verändern auch ihren Verlauf. So haben die starken Schubspannungsbeanspruchungen am Anfang der Verbindung unterschiedliche Vorzeichen. Die Normalkräfte sind im Zentrum auch in den Randbereichen geringer als am ungestützten Rand der Struktur.

Als nächstes soll geschaut werden, ob es sich bei steifen Verbindungen genauso verhält. Die folgenden Diagramme stellen die Schnittgrößen in der Verbindung 021 und der Verbindung 933

bei einer Berechnung mit steifen Anschlüssen gegenüber. Zu den Schnittkräften  $N'$ ,  $V'$  und  $N_{xy}$  kommt noch das Moment  $M_y$  hinzu.

#### 7.4.3.2 steif

Bei steifen Anschlüssen in der Struktur ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den gelenkigen. Einen graphischen Vergleich der Schnittgrößenverläufe liefern die Abbildungen in Anhang C.3.2. Im Abschnitt zwischen den Randbereichen verringern sich die Beanspruchungen leicht. Hier sind sie in der Linie 021 im Rand der Struktur ohnehin schon gering. In den Endbereichen der Verbindung sind sie jedoch im Zentrum der Struktur teilweise größer im Vergleich zum ungestützten Rand. Einzig beim Moment  $M_y$  lassen sich in der Verbindung 933 deutlich geringere Werte an als in Verbindung 021 über den gesamten Verlauf feststellen.

### 7.5 Zusammenfassung

Die Berechnungen dieses Kapitels haben gezeigt, dass eine Übertragung der Schnittgrößen in steifen und gelenkigen Verbindungen prinzipiell möglich ist. Es sind vor allem die Bereiche in Richtung der Verbindungsendpunkte, die bei der Bemessung besonders groß dimensionierte Verbindungsmittel erfordern. In der Mitte zwischen diesen beiden Randbereichen können die Schnittgrößen in beiden Fällen mit Hilfe weniger Verbindungsmittel übertragen werden. Die Dimensionen der Gewindestangen lagen bei beiden Verbindungstypen im selben Bereich. Bei steifen Verbindungen kommt noch das zusätzliche aussteifende Stahlblech hinzu. Dadurch werden die Bemessungsberechnungen umfangreicher und die Ausführung auf der Baustelle komplizierter und teurer. Bevorzugt wird die Verwendung gelenkiger Verbindungsanschlüsse.

Obwohl eine Abschwächung der Schnittgrößen im Zentrum der Struktur zu erwarten war, scheint dies in der betrachteten Verbindung nicht einzutreten. Betrachtet man die graphischen Schnittgrößenvergleiche im Anhang A, so kann man feststellen, dass entlang der Zick-Zack-Linie im First die meisten Schnittgrößen zur Mitte hin auf ähnlich hohem Niveau bleiben. Der Bereich bleibt auch zur Mitte hin mit am stärksten beansprucht. Die Schnittgrößenvergleiche in den Abbildungen C.8 bis C.14 zeigen keine gravierend großen Unterschiede. Die erforderlichen Verbindungsmittel werden sich in den Linienverbindungen im First nicht stark voneinander unterscheiden.

## 8 Vorschläge für eine strukturelle Optimierung des Entwurfs

Die vorangegangenen Berechnungen und Nachweise haben gezeigt, dass das faltwerk in dem Abschnitt zwischen den ungestützten Randbereichen eine gute Tragfähigkeit aufweist. Sowohl für die Verformungen, als auch für die Schnittgrößen ergeben sich hier für beide Varianten der Verbindungsausführung Werte, die für ein gutes Tragverhalten der Struktur in diesem Bereich sprechen. Die Vergleiche der Ergebnisse der Nachweisführungen in Kapitel 6 ergaben sogar ein etwas günstigeres Tragverhalten für gelenkige Linienverbindungen als bei steifen Linienverbindungen in der Mitte der Struktur. In diesem Bereich können die Verbindungen durchaus gelenkig ausgeführt, was im Vergleich zu der Ausführung steifer Anschlüsse deutlich kostengünstiger ist.

Dagegen treten im Randbereich Probleme sowohl bei den Spannungsnachweisen in Kapitel 6 als auch bei den berechneten Verformungen in Kapitel 5 auf. Bei steifen Linienverbindungen können die Verformungen zwar so weit reduziert werden, dass sie deutlich unter den Grenzwerten für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit bleiben, doch wurden auch bei steifen Verbindungen zahlreiche Nachweise nicht erfüllt. Der ungestützte Randbereich erfordert also zusätzliche aussteifende Maßnahmen, die die Verformungen und Spannungen reduzieren und dabei die charakteristischen Merkmale der Struktur nicht zu stark verändern.

In diesem Kapitel werden Vorschläge für solche Veränderungen gemacht und kurz erläutert.

### 8.1 Veränderter Plattenaufbau

Ein erster allgemeiner Vorschlag für die Verbesserung der Tragfähigkeit ist ein veränderter Plattenaufbau. Die Probleme bei der Nachweisführung in den Platten aus Kapitel 6 ergaben sich vor allem in den Nachweisen der Spannungen in  $y$ -Richtung der Brettspertholzplatte. In dieser Richtung werden die Deckschichten quer zur Faser beansprucht. Holz hat senkrecht zur Faserrichtung nur sehr geringe Festigkeiten im Vergleich zu den Festigkeiten längs zur Faserrichtung. Daher eignet sich der Querschnittsaufbau schlecht für die Übertragung der Momente  $m_y$ , da die stärksten Querschnittsteile im Schwerpunkt liegen und nicht am Rand des Querschnitts. Daher scheint die Verwendung von Querschnitten sinnvoll, die mindestens einen 5-schichtigen Plattenaufbau haben. Um so mehr Schichten der Querschnitt hat, um so geringer werden die Unterschiede der Steifigkeitswerte in den beiden Hauptrichtungen, da mehr Querlagen mit Ausrichtung der Fasern in  $y$ -Richtung vorhanden sind. In Tabelle 8.1 werden die Steifigkeitswerte des bisher verwendeten Plattenaufbaus aus drei Schichten mit je 5 cm Dicke mit zwei weiteren Plattenquerschnitten verglichen. Der erste Vergleichsquerschnitt ist ebenfalls insgesamt 15 cm dick und setzt sich

aus fünf Schichten zu je 3 cm Dicke zusammen. Ein zweiter Querschnitt hat eine Plattendicke von 20 cm und mit fünf Brettlagen zu je 4 cm Dicke. Eine Vergrößerung der Plattendicke auf 20 cm scheint sinnvoll, da sich unter Beibehaltung der Plattendicke von 15 cm die Steifigkeiten in x-Richtung verringern, wenn zwischen einem 3-schichtigen und einem 5-schichtigen Aufbau verglichen wird. Allerdings lässt beim Vergleichsquerschnitt 1 bereits ein dreifacher Anstieg der Biegesteifigkeit in y-Richtung feststellen. Auf die Dehnsteifigkeit  $D_y$  hat die Veränderung des Querschnitts keinen großen Einfluß. Sie erhöht sich beim Vergleichsquerschnitt 1 um den Faktor 1,16. Bei einem dickeren Plattenaufbau im Vergleichsquerschnitt 2 kann die Biegesteifigkeit  $B_y$  auf das 8,5-fache gesteigert werden.

Tab. 8.1: Vergleich der Steifigkeiten unterschiedlicher Plattenaufbauten

	Bisheriger Plattenquerschnitt	Vergleichs- querschnitt 1	Vergleichs- querschnitt 2
Plattendicke	150 mm	150 mm	200 mm
Schichtdicke	3 x 50 mm	5 x 30 mm	5 x 40 mm
Biegesteifigkeit $B_x$	2292 kNm <sup>2</sup> /m	1882 kNm <sup>2</sup> /m	82 %
Biegesteifigkeit $B_y$	134 kNm <sup>2</sup> /m	483 kNm <sup>2</sup> /m	320 %
Drillsteifigkeit $B_{xy}$	221 kNm <sup>2</sup> /m	180 kNm <sup>2</sup> /m	81 %
Dehnsteifigkeit $D_x$	846154 kN/m	726923 kN/m	86 %
Dehnsteifigkeit $D_y$	393846 kN/m	455538 kN/m	116 %
Schubsteifigkeit $D_{xy}$	54495 kN/m	42058 kN/m	77 %

## 8.2 steife Verbindungen im Randbereich

Eine Möglichkeit, die Verformungen im Randbereich zu verringern, könnte darin liegen, den Bereich am ungestützten Rand durch die Anordnung steifer Plattenanschlüsse zu versteifen. Auch die Schnittgrößen in den Platten würden für den Fall geringere Werte annehmen. Die Darstellung der Schnittgrößen in Anhang A und die Darstellungen der Verformungen in Abbildung 5.1 zeigen, das bei gelenkigen Linienverbindungen vor allem die ersten vier Plattenreihen am Rand besonders stark beansprucht werden. Somit würde es sinnvoll erscheinen, die Verbindungen in diesem Bereich biegesteif auszuführen und im restlichen Abschnitt im Zentrum die Verbindungen als gelenkig beizubehalten. Da auch bei der Nachweisführung mit steifen Linienverbindungen in Kapitel 6 in diesem Bereich Probleme auftraten, geht diese Maßnahme einher mit einer Veränderung des Plattenaufbaus und der Plattendicke.

## 8.3 Abgestützter Randbereich

Sollen in der gesamten Struktur gelenkige Verbindungen verwendet werden, so ist der Randbereich durch die Anordnung äußerer Stützen in der Bogenöffnung auszusteifen. Ein Fazit aus den Verformungsdarstellungen in Abbildung 5.3 und 5.4 im Abschnitt 5.1, war, dass vor allem die Verformungen in die globale X- und Y-Richtung sehr große Werte angenommen haben. Im First liegt die vertikale Verformung sowohl bei gelenkigen als auch bei steifen Verbindungen in einem vertretbaren Bereich. Im Bereich unterhalb des Firsts allerdings nahmen auch die Verformungen in

Z-Richtung große Werte an, die die Gebrauchstauglichkeit des Tragwerks beeinträchtigen. Somit bietet sich eine Anordnung der Stützen in diesen Bereichen und nicht in der Mitte des Bogens an. Zusätzlich können durch die Anordnung von dünnen Fachwerkverbänden die Verformungen in X-Richtung reduziert werden. Die Abbildung 8.1 zeigt skizzenhaft einige Vorschläge für die Anordnung der Stützen sowie versteifender Verbände in der Bogenebene. Es ist zu überprüfen, ob damit auch die Verformungen in Y-Richtung erheblich reduziert werden.

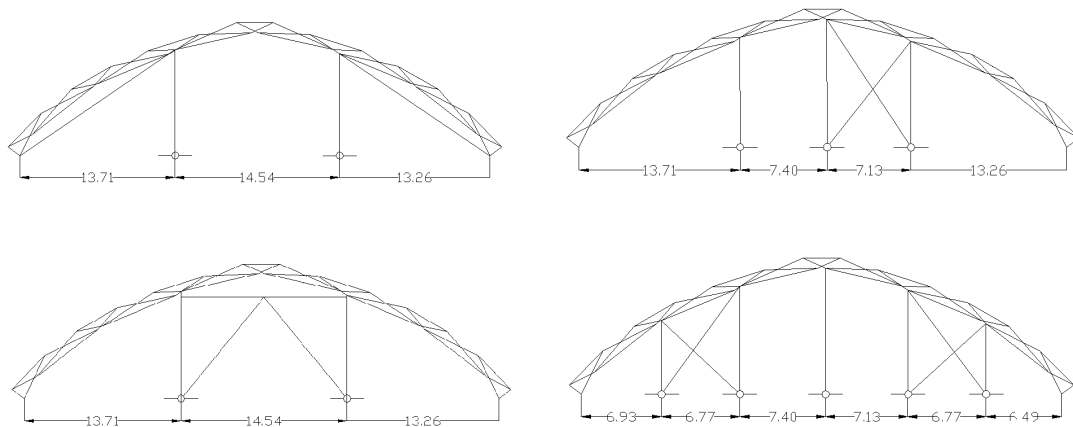


Abb. 8.1: Vorschläge zur Aussteifung des instabilen Randbereichs

## 8.4 Engere Faltung am Rand

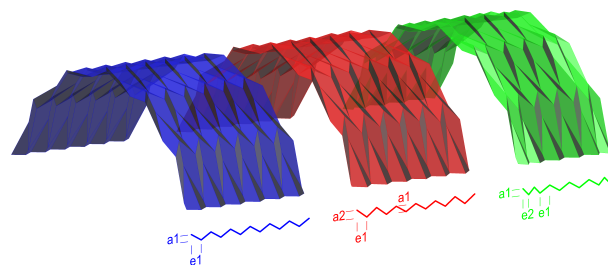


Abb. 8.2: Erhöhung der Steifigkeiten durch Variation der Faltungen

Faltwerke erreichen eine höhere Steifigkeit, je enger die Faltung ausgeführt wird. Diese Tatsache könnte genutzt werden, indem die Faltungen in der Richtung der globalen Y-Achse variiert werden. Am Rand müsste damit das Faltwerk verdichtet werden, da hier die großen Beanspruchungen und Verformungen auftreten. Neben der Verdichtung kommt auch eine Überhöhung der Falten im Vergleich zu den zum Zentrum in Betracht. Auch dadurch kann die Steifigkeit bereichsweise erhöht werden. Die Abbildungen 8.2 zeigt mögliche Variationen der Faltungen, mit denen die Tragfähigkeitswerte im Rand erhöht werden könnten. Die blaue Figur stellt die ursprüngliche Faltung dar. In der roten Figur wird die Höhe der Faltungen am Rand  $a_2$  erhöht und die Länge

$e_1$  wird beibehalten. Bei der dritten Variante in der grünen Figur werden die Faltungen am Rand  $e_1$  verengt und die Höhe  $a_2$  beibehalten. Selbstverständlich ist auch eine Kombination der beiden Varianten möglich.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das abschließende Kapitel soll eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse geben und die Ergebnisse noch einmal kritisch betrachten. Desweiteren soll ein Ausblick auf die weitere Entwicklung des Forschungsprojekts erfolgen, indem Problemstellungen und Schlußfolgerungen formuliert werden.

### 9.1 Zusammenfassung

Anhand der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die numerische Modellierung und Berechnung mit anschließender Bemessung von Origami-Faltwerken möglich ist. Durch unterschiedliche Voruntersuchungen konnten die erforderliche Einstellungen der Modellierungsparameter ermittelt werden, die zu aussagefähigen Ergebnissen führten. Nachdem diese Einstellungen in dem verwendeten FE-Programm gefunden wurden, konnten die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen auf den Entwurf der Tennishalle angewandt und die Schnittgrößen und Verformungen an den beiden Ausführungsvarianten berechnet werden. Mit den erhaltenen Schnittgrößen konnten anhand eines gewählten Plattenaufbaus Nachweise der auftretenden Spannungen in den einzelnen Schichten durchgeführt werden. Dabei zeigte sich, dass das Tragwerk sehr interessante Tragfähigkeiten in den kontinuierlichen Bereichen im Zentrum der Struktur aufweist. Die Resultate liegen für gelenkige und für biegesteife Verbindungen nah beieinander. Die prinzipielle Tragfähigkeit konnte in diesem Bereich bestätigt werden. Sobald allerdings der Randbereich betrachtet wird, ergeben sich sehr starke Unterschiede in den auftretenden Schnittgrößen und Verformungen. Besonders bei gelenkigen Verbindungen verliert die Struktur zum Rand hin seine komplette Tragfähigkeit. Es zeigte sich, dass dieser Bereich ohne zusätzliche Maßnahmen nicht ausreichend tragfähig ist. Aus den Auswertungen der Berechnungen könnten Vorschläge zur Verbesserung der Tragfähigkeit abgeleitet werden.

Desweiteren konnten Verfahren entwickelt werden, um die ausgegebenen Schnittgrößen so zu verarbeiten, dass eine Bemessung der Verbindungen möglich ist. Es wurden Ansätze zur Bemessung einer stiftförmigen Verbindung in unter Gehrung zusammengefügtten Brettspertholzplatten für beide Verbindungsfälle vorgelegt, die anhand eines Beispiels zeigen konnten, dass die Übertragung der auftretenden Beanspruchungen in den Verbindungen theoretisch möglich ist.

### 9.2 Kritische Betrachtung

Für die Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode wurde das orthotrope Materialverhalten der Brettspertholzplatten außer Acht gelassen und diese durch ein angenommenes isotropes Material ersetzt. Durch diese Vereinfachung konnte ein Einblick in das Tragverhalten solch einer



gefalteten Struktur und die Dimensionen der auftretenden Schnittgrößen gewonnen werden. Für zukünftige Berechnungen mit dem Ziel einer baustatischen Zulassung ist es jedoch notwendig, die Orthogonalität mit in die numerische Modellierung mit einzubeziehen. Desweiteren traten besonders bei der Berechnung mit gelenkig modellierten Linienverbindungen in Bereichen der Strukturknoten fehlerhafte Ergebnisse auf. Diese entstehen durch Probleme der Finiten-Elemente-Methode in Bereichen von Diskontinuitäten und dem Auftreten spitzer und stumpfer Winkel. Zwar konnten diese Probleme durch die Anordnung kreisrunder Öffnungen um die Knotenpunkte reduziert werden, doch blieb ein gewisser Einfluss dieser Störstellen auf die weitere Berechnung bestehen.

Als aufwendig bei der Modellierung und der Verwendung der berechneten Schnittgrößen erwies sich die Definition der lokalen Achsensysteme. Diese müssen in RFEM für jede Fläche definiert werden, um eine Übereinstimmung mit der gewünschten Ausrichtung der Faserrichtungen der Brettsperrholzplatten zu erreichen. Durch die vorhandene Symetrie des Faltnetzes und der Möglichkeit, bestimmte Bereiche in dem Programm samt Einstellungen zu kopieren, spiegeln, rotieren und neu anzuordnen, konnte der Arbeitsaufwand in Grenzen gehalten werden. Bei der Betrachtung der Liniengelenke müssen die lokalen Koordinatensysteme jedoch wieder neu ausgerichtet werden, da sich die angezeigten Schnittgrößen in den Anschlüssen nicht an der Richtung der Anschlusslinien orientieren, sondern an der Definition der lokalen Koordinatensysteme der angrenzenden Platten.

Die Bemessungen der Verbindungen erfolgten durch Kombination bekannter Nachweisverfahren mit aktuellen Erkenntnissen aus veröffentlichten Forschungsberichten. Eine durch eine Norm geregelte Bemessung von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholzplatten lag zum Zeitpunkt der Bearbeitung in der Form noch nicht vor. Es konnten auch keine Vergleiche der Verformungen in den Verbindungen durchgeführt werden, da in RFEM nur die globalen Verdrehungen ausgegeben werden können. Eine Bestimmung der Verdrehungen zwischen den beiden Platten der betrachteten Verdrehung bei gelenkiger Verbindung fand daher nicht statt. Somit konnte auch kein Vergleich der Verdrehungen zwischen gelenkiger und steifer Verbindung durchgeführt werden.

### 9.3 Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass an der betrachteten Struktur eines Origami-Faltnetzes interessante Tragfähigkeiten ermittelt werden konnten. Aus den Erkenntnissen der Berechnungen und dem Erkennen bestimmter Problempunkte wurden Vorschläge zur Optimierung des Tragverhaltens durch strukturelle Veränderungen getroffen. Die Wirksamkeit dieser und weiterer Veränderungen ist durch weitere Berechnungen zu überprüfen. Die Erfahrungen aus der Berechnung an diesem Modell können dabei verwendet werden. Die Ergebnisse der vorhandenen Arbeit können außerdem als Bezugswerte der zukünftigen Vergleiche verwendet werden.

Für die Bemessung der Verbindungen sind Versuchsreihen zu entwickeln, mit denen die getroffenen Ansätze zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Verbindungen überprüft werden können. Gegebenenfalls sind die Verbindungstechniken zu optimieren. Im Zusammenhang mit den Verbindungsbemessungen sind auch die hohen auftretenden Randwerte zu überprüfen. Dafür ist eine

genaue Auseinandersetzung mit der Funktionsweise des Finite-Elemente-Programms notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit so nicht möglich war. In dieser Arbeit wurde die Berechnungen mit Hilfe eines einzigen FE-Programms durchgeführt. Die Ergebnisse sind im weiteren mit den Resultaten anderer numerischer Berechnungshilfen zu vergleichen.

# A Graphische Gegenüberstellung der Schnittgrößen

## A.1 Moment $m$ - $x$

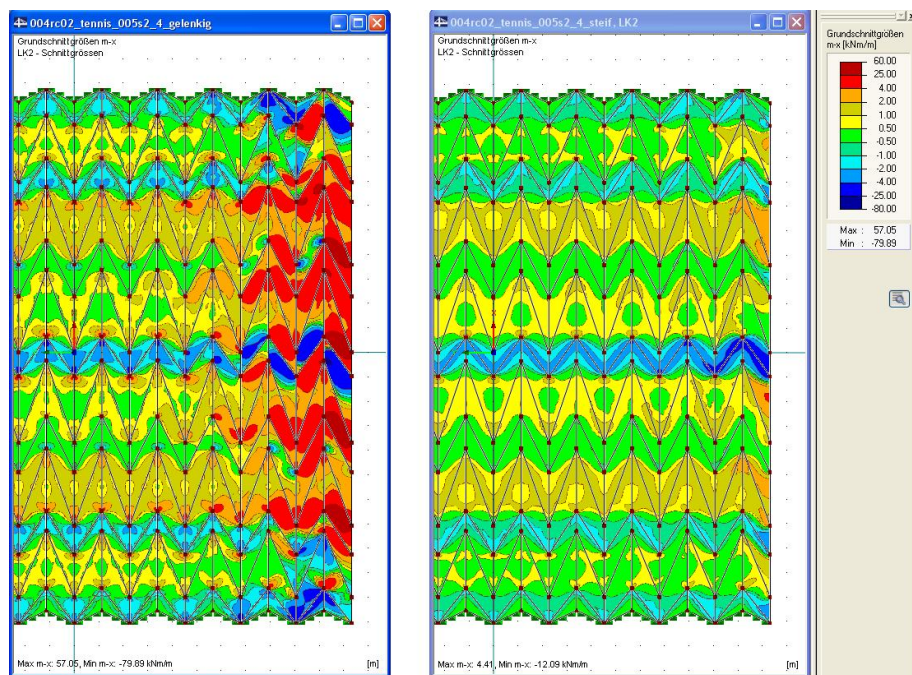


Abb. A.1: Gegenüberstellung des Momentes  $m$ - $x$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)

## A.2 Normalkraft $n-x$

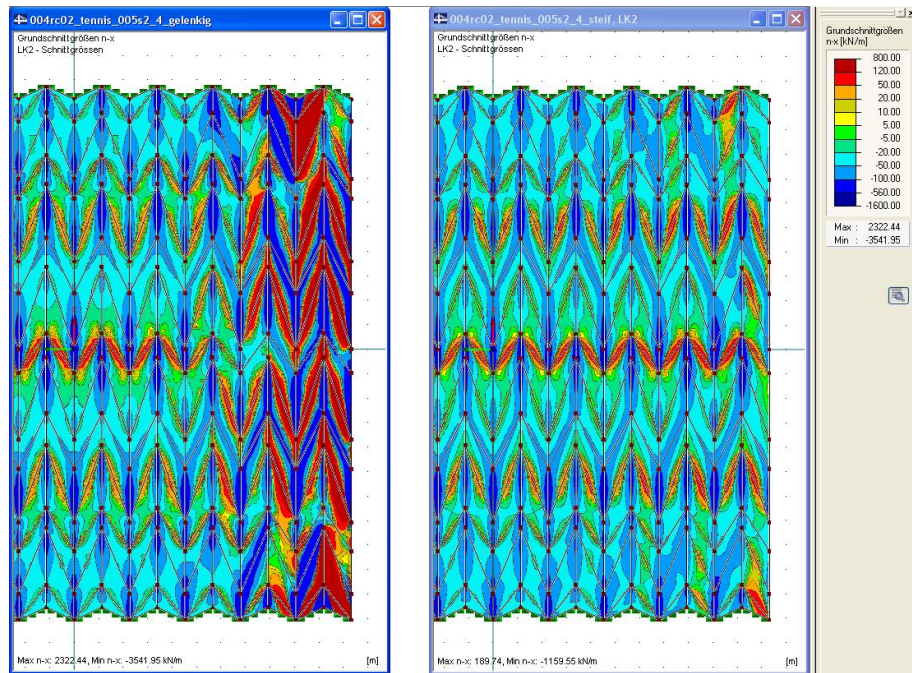


Abb. A.2: Gegenüberstellung der Normalkraft  $n-x$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)

## A.3 Querkraft $v-x$

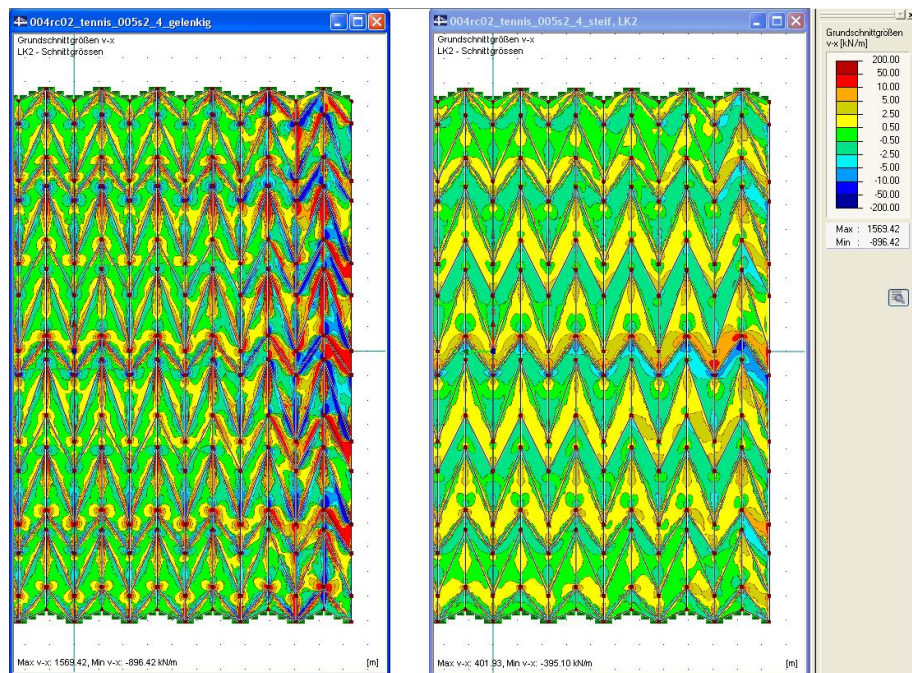


Abb. A.3: Gegenüberstellung der Querkraft  $v-x$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)



## A.4 Moment $m-y$

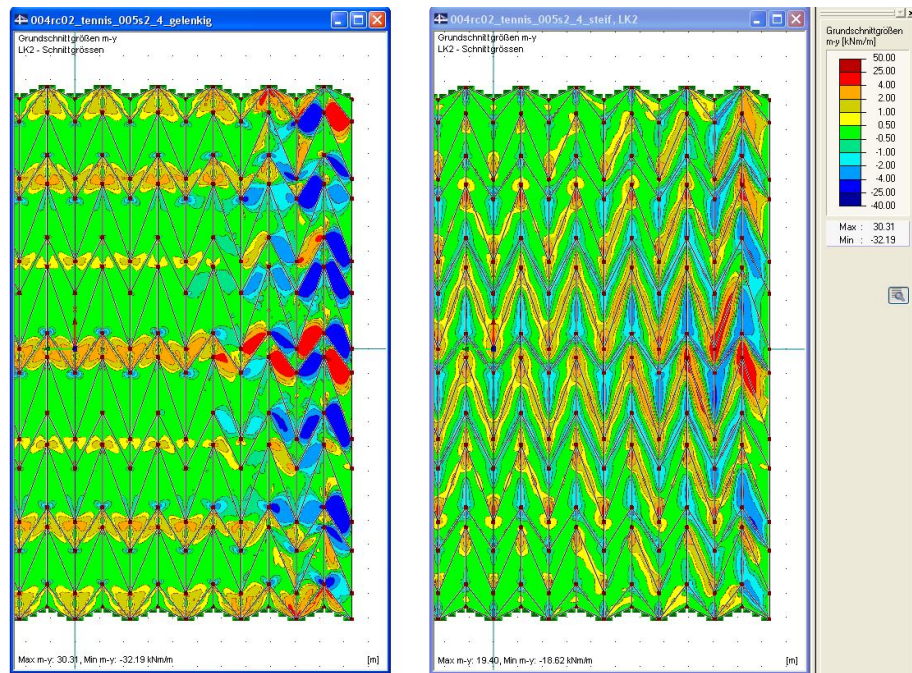


Abb. A.4: Gegenüberstellung des Moments  $m-y$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)

## A.5 Normalkraft $n-y$

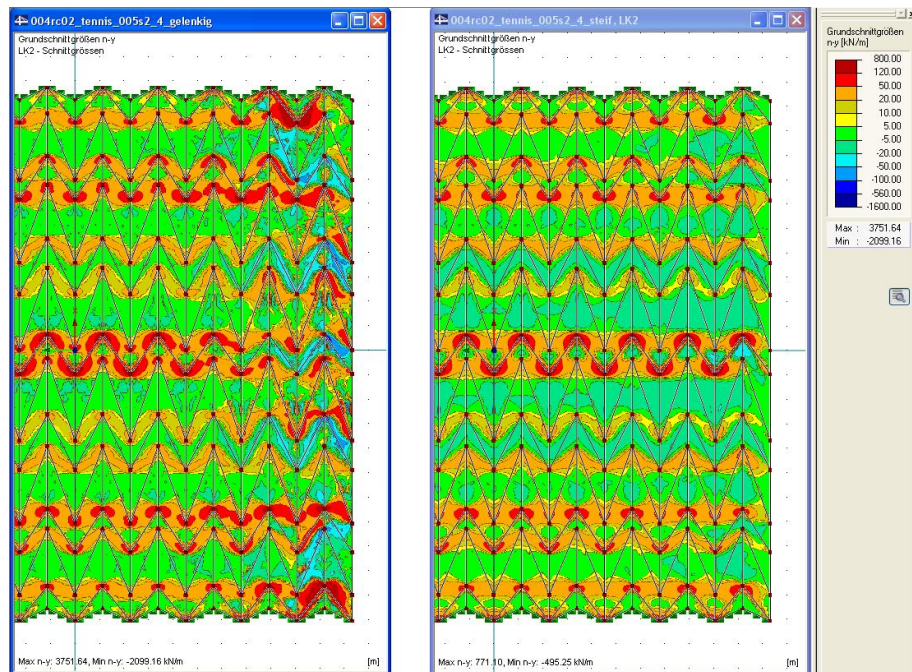


Abb. A.5: Gegenüberstellung der Normalkraft  $n-y$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)



## A.6 Querkraft $v-y$

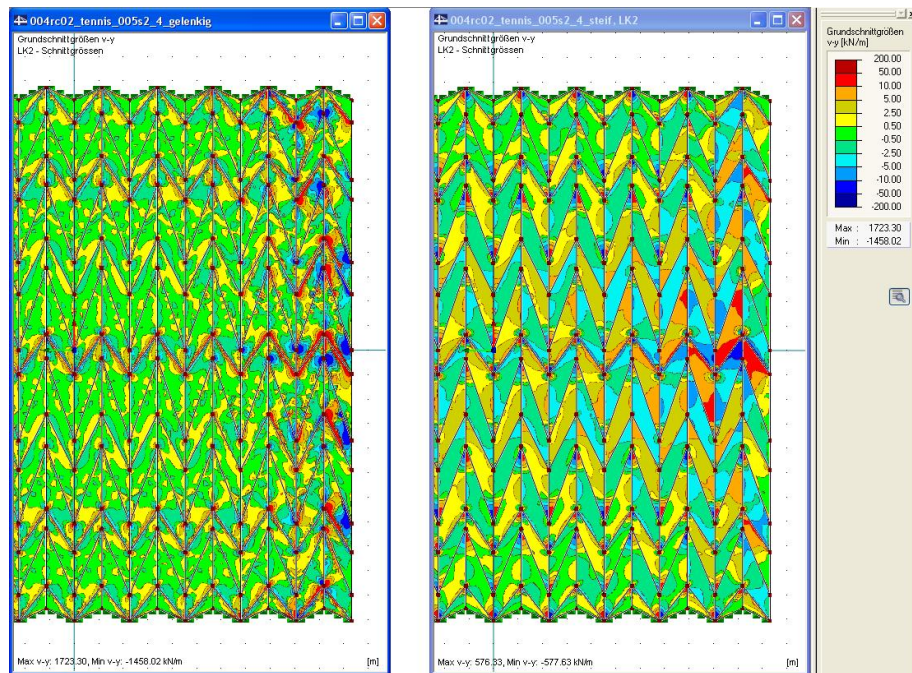


Abb. A.6: Gegenüberstellung der Querkraft  $v-y$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)

## A.7 Schubmoment $m-xy$

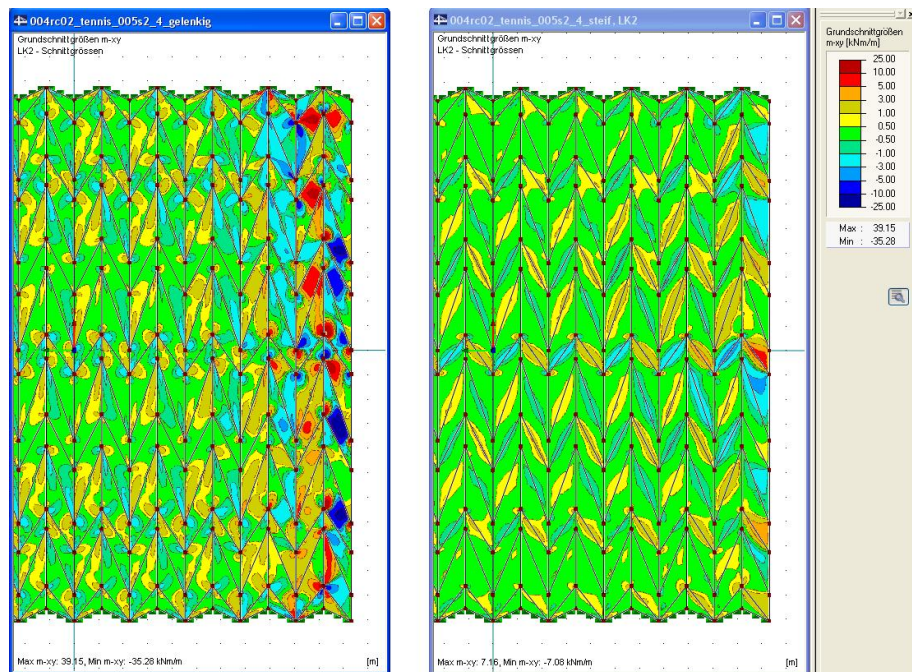


Abb. A.7: Gegenüberstellung des Schubmoments  $m-xy$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)

## A.8 Schubkraft n-xy

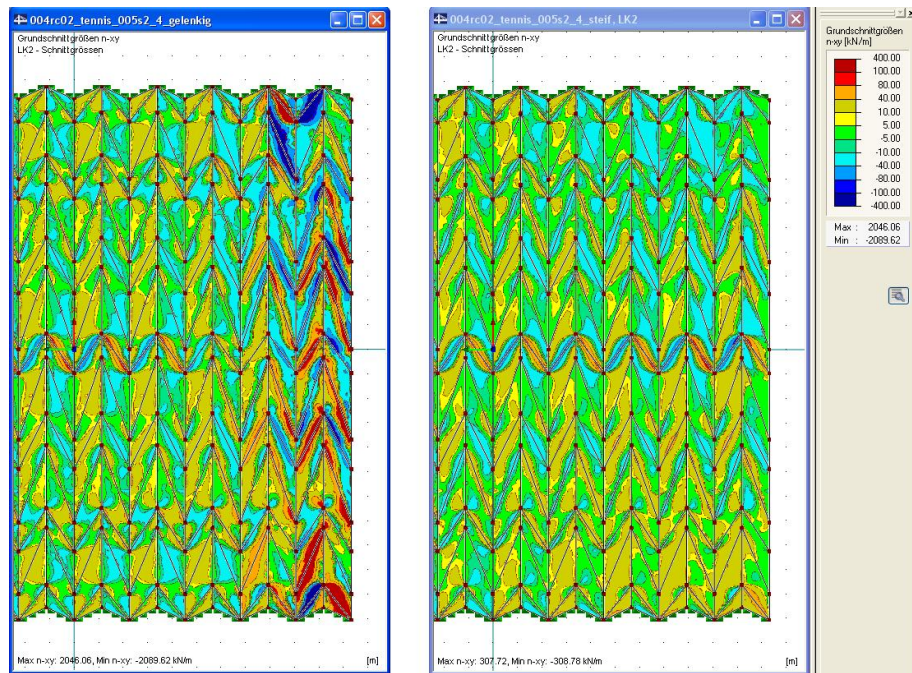


Abb. A.8: Gegenüberstellung der Schubkraft  $n_{xy}$  bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts)





# B Plattennachweise

## B.1 Plattensteifigkeiten

Tab. B.1: Plattensteifigkeiten für Biegung und Drillung

### Biegesteifigkeiten

$B_x$		1	2	3	
Festigkeitsklasse	C24	C20	C24		
$E_{x,i}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8462	0	8462		
$d_i$ [mm]	50	50	50		
$z_i$ [mm]	-50	0	50		
				$\Sigma$	
$B_{xS,i}$ [kNm <sup>2</sup> /m]	1057,69	0,00	1057,69		2115,38
$B_{xE,i}$ [kNm <sup>2</sup> /m]	88,14	0,00	88,14		176,28
					<u><u>2291,67</u></u> [kNm <sup>2</sup> /m]

$B_y$		1	2	3	
Festigkeitsklasse	C24	C20	C24		
$E_{y,i}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	285	7308	285		
$d_i$ [mm]	50	50	50		
$z_i$ [mm]	-50	0	50		
				$\Sigma$	
$B_{yS,i}$ [kNm <sup>2</sup> /m]	35,58	0,00	35,58		71,15
$B_{yE,i}$ [kNm <sup>2</sup> /m]	2,28	58,56	2,28		63,12
					<u><u>134,27</u></u> [kNm <sup>2</sup> /m]

### Drillsteifigkeit

$B_{xy}$		1	2	3	
Festigkeitsklasse	C24	C20	C24		
$G_{xy,i}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	531	0	531		
$d_i$ [mm]	50	50	50		
$z_i$ [mm]	-50	0	50		
				$\Sigma$	
$B_{xS,i}$ [kNm <sup>2</sup> /m]	102,07	0,00	102,07		204,14
$B_{xE,i}$ [kNm <sup>2</sup> /m]	8,51	0,00	8,51		17,01
					<u><u>221,15</u></u> [kNm <sup>2</sup> /m]

Tab. B.2: Schubsteifigkeiten für Querkraftbeanspruchungen

Schubsteifigkeiten

E*S <sub>x</sub> Schubverformung in der xz-Ebene (Querkraft q <sub>x</sub> )				
	1	2	3	
Festigkeitsklasse	C24	C20	C24	
E <sub>x,i</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	8462	246	8462	
S <sub>x</sub> (0)	0			<b>0,00 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>x</sub> (25 mm)	13221,15			<b>13221,15 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>x</sub> (50 mm)	21153,85	21153,85		<b>21153,85 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>x</sub> (75 mm)		21230,77		<b>21230,77 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>x</sub> (100 mm)		21153,85	21153,85	<b>21153,85 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>x</sub> (125 mm)			13221,15	<b>13221,15 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>x</sub> (150 mm)			0	<b>0,00 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>

E*S <sub>y</sub> Schubverformung in der yz-Ebene (Querkraft q <sub>y</sub> )				
	1	2	3	
Festigkeitsklasse	C24	C20	C24	
E <sub>y,i</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	285	7308	285	
S <sub>y</sub> (0)	0			<b>0,00 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>y</sub> (25 mm)	444,71			<b>444,71 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>y</sub> (50 mm)	711,54	711,54		<b>711,54 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>y</sub> (75 mm)		2995,19		<b>2995,19 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>y</sub> (100 mm)		711,54	711,54	<b>711,54 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>y</sub> (125 mm)			444,71	<b>444,71 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>
S <sub>y</sub> (150 mm)			0	<b>0,00 [kNm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]</b>

Tab. B.3: Scheibensteifigkeiten der gewählten BSP-Platte

Dehnsteifigkeiten

$D_x$				
	1	2	3	
Festigkeitsklasse	C24	C20	C24	
$E_{x,i}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8462	0	8462	
$d_i$ [mm]	50	50	50	
				$\Sigma$
$D_{x,i}$ [kN/m]	423077	0,00	423077	<u><u>846154</u></u> [kN/m]

$D_y$				
	1	2	3	
Festigkeitsklasse	C24	C20	C24	
$E_{x,i}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	285	7308	285	
$d_i$ [mm]	50	50	50	
				$\Sigma$
$D_{y,i}$ [kN/m]	14231	365385	14231	<u><u>393846</u></u> [kN/m]

Schubsteifigkeit

$D_{xy}$				
	1	2	3	
Festigkeitsklasse	C24	C20	C24	
$G_{xy,i}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	531	454	531	
$d_i$ [mm]	50	50	50	
				$\Sigma$
$D_{xy,i}$ [kN/m]	26538	5673	26538	<u><u>58750</u></u> [kN/m]

## B.2 Schnittgrößenzusammenstellungen

### B.2.1 Fläche 007

Tab. B.4: Ausgabe der Grundschnittgrößen durch RFEM in Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung

Raster Punkt	Rasterpunkt-Koordinaten [m]			Momente [kNm/m]			Querkräfte [kN/m]		Normalkräfte [kN/m]		
	X	Y	Z	$m_x$	$m_y$	$m_{xy}$	$v_x$	$v_y$	$n_x$	$n_y$	$n_{xy}$
9	-2,212	-22,414	11,499	-11,55	1,86	-4,78	-7,31	6,13	-182,82	6,07	-19,94
10	-1,803	-22,127	11,499	-15,99	10,16	-2,36	5,06	8,18	-119,76	22,86	-43,22
11	-1,393	-21,840	11,499	-15,54	12,62	2,13	7,50	2,70	-89,66	6,41	-30,06
12	-0,984	-21,553	11,499	-17,02	13,22	2,59	4,65	-2,04	-73,42	-6,90	-23,17
13	-0,575	-21,266	11,499	-18,64	12,49	0,82	3,28	-5,67	-62,24	-7,96	-16,36
14	-0,165	-20,979	11,499	-13,05	5,55	-3,76	8,14	-3,83	-38,95	-16,40	-11,96
15	0,244	-20,692	11,499	-4,83	-0,01	-4,06	11,88	2,10	45,51	-9,37	14,30
16	0,654	-20,405	11,499	-0,03	-0,20	-0,09	4,94	11,23	129,32	1,47	7,72
25	-2,849	-22,376	11,194	-5,17	0,94	-1,14	-4,14	2,10	-220,08	-0,55	-21,69
26	-2,440	-22,089	11,194	-8,63	4,50	-0,68	-1,48	2,64	-98,05	3,15	-33,36
27	-2,030	-21,802	11,194	-10,97	7,35	1,55	-0,98	1,49	-39,69	12,59	-28,26
28	-1,621	-21,515	11,194	-14,76	10,50	4,81	-1,66	-1,33	-6,33	17,79	-3,45
29	-1,211	-21,228	11,194	-19,10	12,42	6,49	-4,10	-4,95	19,03	14,68	22,39
30	-0,802	-20,941	11,194	-25,36	14,09	-0,45	0,72	-11,70	6,78	23,03	22,99
31	-0,392	-20,654	11,194	-22,55	7,10	-10,94	20,46	-13,08	81,37	12,45	21,93
40	-3,895	-22,626	10,888	-1,01	0,00	-0,09	-8,81	0,13	-422,03	-0,34	-1,43
41	-3,486	-22,339	10,888	-2,29	0,34	-0,37	-3,01	1,14	-264,24	-0,23	-22,95
42	-3,076	-22,052	10,888	-4,55	2,02	0,03	-2,09	1,86	-102,97	-2,00	-29,70
43	-2,667	-21,765	10,888	-6,19	3,76	1,25	-1,63	1,76	-15,07	2,70	-21,18
44	-2,257	-21,478	10,888	-7,82	5,46	3,26	-1,80	1,26	41,39	11,65	-3,05
45	-1,848	-21,191	10,888	-11,15	7,80	6,74	-5,19	-0,34	68,21	22,41	25,15
46	-1,439	-20,904	10,888	-14,07	8,50	9,10	-22,95	-5,40	83,53	24,05	48,88
47	-1,029	-20,617	10,888	-30,83	11,19	8,28	-96,68	-40,44	82,26	6,15	52,80
56	-4,532	-22,589	10,583	0,68	0,00	-0,01	-0,53	0,21	-476,70	0,30	-15,86
57	-4,122	-22,302	10,583	-0,11	0,34	0,19	-1,49	0,57	-211,85	-4,55	-35,87
58	-3,713	-22,015	10,583	-0,88	0,79	0,54	-1,49	0,74	-39,39	-4,46	-25,34
59	-3,304	-21,728	10,583	-2,29	1,73	1,51	-1,85	0,90	85,55	0,98	1,95
60	-2,894	-21,441	10,583	-2,93	2,29	2,56	-5,31	-0,05	150,79	10,14	31,52
61	-2,485	-21,154	10,583	-3,85	2,66	3,65	-19,54	-2,90	163,78	21,63	57,78
62	-2,075	-20,867	10,583	-0,20	-0,04	0,21	-14,97	6,25	71,45	14,88	29,87
72	-5,168	-22,552	10,277	2,00	0,02	0,11	1,56	0,08	-624,32	-0,75	-16,65
73	-4,759	-22,265	10,277	1,17	0,21	0,37	-1,00	0,24	-237,56	-5,72	-40,11
74	-4,350	-21,978	10,277	0,61	0,41	0,53	-1,17	0,18	-2,12	-2,47	-20,00
75	-3,940	-21,691	10,277	0,14	0,55	0,80	-2,01	0,04	146,56	5,25	15,55
76	-3,531	-21,404	10,277	0,02	0,36	0,73	-10,91	-1,58	241,63	15,11	59,79
88	-5,805	-22,515	9,972	3,34	0,16	0,76	0,77	0,30	-572,77	7,83	-40,65
89	-5,396	-22,228	9,972	2,49	0,32	0,85	-1,40	-0,30	-33,20	6,48	-12,35
90	-4,986	-21,941	9,972	1,72	0,27	0,65	-2,05	-0,70	242,18	44,03	54,06
104	-6,442	-22,478	9,667	5,86	0,41	1,79	1,69	0,95	-620,68	-96,61	-7,11

Tab. B.5: Ausgabe der Grundschnittgrößen durch RFEM in Fläche 007 bei steifer Ausführung

Raster Punkt	Rasterpunkt-Koordinaten [m]			Momente [kNm/m]			Querkräfte [kN/m]		Normalkräfte [kN/m]		
	X	Y	Z	$m_x$	$m_y$	$m_{xy}$	$v_x$	$v_y$	$n_x$	$n_y$	$n_{xy}$
9	-2,212	-22,414	11,499	-4,11	2,21	0,84	-6,49	7,75	16,57	-5,07	-6,61
10	-1,803	-22,127	11,499	-4,09	-0,10	2,65	-1,70	9,08	17,67	0,61	-4,60
11	-1,393	-21,840	11,499	-2,93	-3,20	2,38	-0,30	10,32	24,11	-4,19	-3,84
12	-0,984	-21,553	11,499	-2,57	-3,63	2,13	-0,14	11,75	11,85	-8,23	-4,19
13	-0,575	-21,266	11,499	-2,15	-3,31	2,04	0,85	13,10	-9,68	-11,26	-2,78
14	-0,165	-20,979	11,499	-1,45	-3,05	2,10	2,97	16,04	-45,05	-19,64	2,71
15	0,244	-20,692	11,499	-0,11	-1,46	2,55	2,68	19,25	-113,49	-49,04	39,62
16	0,654	-20,405	11,499	-3,23	-2,62	2,80	-11,95	23,73	-252,26	-179,66	183,66
25	-2,849	-22,376	11,194	-0,84	4,10	-1,40	-2,32	4,11	4,89	3,84	-5,23
26	-2,440	-22,089	11,194	-1,28	4,11	-0,08	-0,57	5,09	-1,58	-4,15	-3,16
27	-2,030	-21,802	11,194	-0,63	3,62	0,73	-0,17	6,83	-10,97	-5,95	0,41
28	-1,621	-21,515	11,194	0,17	2,63	1,49	0,27	9,09	-26,42	-10,41	9,82
29	-1,211	-21,228	11,194	0,94	2,85	1,83	0,75	10,03	-48,77	-17,05	22,75
30	-0,802	-20,941	11,194	0,35	1,24	2,17	2,21	11,59	-70,83	-17,99	24,20
31	-0,392	-20,654	11,194	1,92	2,95	2,47	5,61	13,17	-119,07	-38,57	46,98
40	-3,895	-22,626	10,888	1,63	1,83	-1,75	-9,11	8,42	7,02	6,05	-6,84
41	-3,486	-22,339	10,888	0,28	3,96	-1,86	-1,16	2,74	2,38	4,86	-4,46
42	-3,076	-22,052	10,888	0,00	4,93	-1,08	0,79	2,99	-4,74	-1,00	-0,07
43	-2,667	-21,765	10,888	0,50	5,32	-0,39	1,16	4,30	-12,22	-6,48	3,72
44	-2,257	-21,478	10,888	1,35	5,70	0,28	1,58	5,89	-22,44	-12,13	10,15
45	-1,848	-21,191	10,888	2,45	5,89	1,15	1,66	8,31	-41,38	-21,83	25,07
46	-1,439	-20,904	10,888	3,44	6,53	1,70	1,28	9,66	-62,26	-34,21	45,84
47	-1,029	-20,617	10,888	3,38	6,33	2,33	-0,71	8,26	-104,45	-44,57	77,85
56	-4,532	-22,589	10,583	1,07	1,94	-1,48	-2,23	2,57	1,78	3,50	-2,75
57	-4,122	-22,302	10,583	0,61	3,37	-1,48	1,28	0,39	-3,44	2,66	-0,37
58	-3,713	-22,015	10,583	0,83	4,33	-1,18	1,99	0,55	-8,59	-0,15	2,84
59	-3,304	-21,728	10,583	1,56	5,68	-0,63	2,80	1,81	-14,57	-7,07	7,95
60	-2,894	-21,441	10,583	2,61	6,75	0,00	4,15	2,87	-19,97	-15,18	14,23
61	-2,485	-21,154	10,583	4,01	8,09	0,83	5,09	5,52	-30,94	-28,77	26,13
62	-2,075	-20,867	10,583	5,21	9,21	1,57	6,43	7,59	-36,60	-46,53	47,93
72	-5,168	-22,552	10,277	0,65	0,98	-0,83	-0,68	0,83	-3,19	-0,89	1,51
73	-4,759	-22,265	10,277	0,54	2,23	-1,10	1,14	-0,48	-6,08	1,47	1,17
74	-4,350	-21,978	10,277	0,66	3,03	-0,96	1,90	-0,78	-10,13	0,18	3,18
75	-3,940	-21,691	10,277	1,12	3,87	-0,64	3,26	-0,92	-13,57	-3,11	5,92
76	-3,531	-21,404	10,277	2,48	5,13	0,20	7,41	-1,17	-16,59	-10,87	10,58
88	-5,805	-22,515	9,972	0,17	0,57	-0,42	-0,18	-0,23	-11,56	-3,36	6,73
89	-5,396	-22,228	9,972	0,12	0,84	-0,49	0,77	-1,40	-10,94	0,16	4,11
90	-4,986	-21,941	9,972	0,23	1,18	-0,42	2,67	-2,67	-14,89	-2,30	4,24
104	-6,442	-22,478	9,667	0,17	0,43	-0,32	-0,43	0,03	-15,15	-8,89	9,79

Tab. B.6: Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 007 in x-Richtung

Grundschnittgrößen in x-Richtung

Fläche Nr. 007

	[no-col]				9	7	1	2	3
	max m-x		zugeh. n-x		zugeh. v-x		x	y	z
gelenkig	5,86		-620,68		1,69		-6,44	-22,48	9,67
steif	5,21		-36,60		6,43		-2,08	-20,87	10,58
	min m-x		zugeh. n-x		zugeh. v-x		x	y	z
gelenkig	-30,83		82,26		-96,68		-1,03	-20,62	10,89
steif	-4,11		16,57		-6,49		-2,21	-22,41	11,50
	[no-col]				4	7	1	2	3
	max n-x		zugeh. m-x		zugeh. v-x		x	y	z
gelenkig	242,18		1,72		-2,05		-4,99	-21,94	9,97
steif	24,11		-2,93		-0,30		-1,39	-21,84	11,50
	min n-x		zugeh. m-x		zugeh. v-x		x	y	z
gelenkig	-624,32		2,00		1,56		-5,17	-22,55	10,28
steif	-252,26		-3,23		-11,95		0,65	-20,41	11,50
	[no-col]				6	4	9	11	7
	max v-x		zugeh. m-xy	zugeh. m-x	zugeh. n-x	zugeh. n-xy	x	y	z
gelenkig	20,46		-10,94	-22,55	81,37	21,93	-0,39	-20,65	11,19
steif	7,41		0,20	2,48	-16,59	10,58	-3,53	-21,40	10,28
	min v-x		zugeh. m-xy	zugeh. m-x	zugeh. n-x	zugeh. n-xy	x	y	z
gelenkig	-96,68		8,28	-30,83	82,26	52,80	-1,03	-20,62	10,89
steif	-11,95		2,80	-3,23	-252,26	183,66	0,65	-20,41	11,50
	max m-xy				zugeh. n-xy	zugeh. v-x	x	y	z
gelenkig	9,10				48,88	-22,95	-1,44	-20,90	10,89
steif	2,80				183,66	-11,95	0,65	-20,41	11,50
	min m-xy				zugeh. n-xy	zugeh. v-x	x	y	z
gelenkig	-10,94				21,93	20,46	-0,39	-20,65	11,19
steif	-1,86				-4,46	-1,16	-3,49	-22,34	10,89
	max n-xy		zugeh. m-xy		zugeh. v-x		x	y	z
gelenkig	59,79		0,73		-10,91		-3,53	-21,40	10,28
steif	183,66		2,8		-11,95		0,65	-20,41	11,50
	min n-xy		zugeh. m-xy		zugeh. v-x		x	y	z
gelenkig	-43,22		-2,36		5,06		-1,80	-22,13	11,50
steif	-6,84		-1,75		-9,11		-3,90	-22,63	10,89

Tab. B.7: Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 007 in y-Richtung

Grundschnittgrößen in y-Richtung

Fläche Nr. 007

	[no-col]					10					8					1					2					3																			
	max m-y					zugeh. n-y					zugeh. v-y					x					y					z																			
gelenkig	14,09					23,03					-11,70					-0,80					-20,94					11,19																			
steif	9,21					-46,53					7,59					-2,08					-20,87					10,58																			
	min m-y					zugeh. n-y					zugeh. v-y					x					y					z																			
gelenkig	-0,20					1,47					11,23					0,65					-20,41					11,50																			
steif	-3,63					-8,23					11,75					-0,98					-21,55					11,50																			
	[no-col]					5					8					1					2					3																			
	max n-y					zugeh. m-y					zugeh. v-y					x					y					z																			
gelenkig	44,03					0,27					-0,70					-4,99					-21,94					9,97																			
steif	6,05					1,83					8,42					-3,90					-22,63					10,89																			
	min n-y					zugeh. m-y					zugeh. v-y					x					y					z																			
gelenkig	-96,61					0,41					0,95					-6,44					-22,48					9,67																			
steif	-179,66					-2,62					23,73					0,65					-20,41					11,50																			
	[no-col]					6					5					10					11					8					1					2					3				
	max v-y		zugeh. m-xy		zugeh. m-y		zugeh. n-y		zugeh. n-xy				x		y		z																												
gelenkig	11,23		-0,09		-0,20		1,47		7,72				0,65		-20,41		11,50																												
steif	23,73		2,80		-2,62		-179,66		183,66				0,65		-20,41		11,50																												
	min v-y		zugeh. m-xy		zugeh. m-y		zugeh. n-y		zugeh. n-xy				x		y		z																												
gelenkig	-40,44		8,28		11,19		6,15		52,80				-1,03		-20,62		10,89																												
steif	-2,67		-0,42		1,18		-2,30		4,24				-4,99		-21,94		9,97																												
	max m-xy					zugeh. n-xy					zugeh. v-y					x					y					z																			
gelenkig	9,10					48,88					-5,40					-1,44					-20,90					10,89																			
steif	2,80					183,66					23,73					0,65					-20,41					11,50																			
	min m-xy					zugeh. n-xy					zugeh. v-y					x					y					z																			
gelenkig	-10,94					21,93					-13,08					-0,39					-20,65					11,19																			
steif	-1,86					-4,46					2,74					-3,49					-22,34					10,89																			
	max n-xy		zugeh. m-xy								zugeh. v-y		x		y		z																												
gelenkig	59,79		0,73								-1,58		-3,53		-21,40		10,28																												
steif	183,66		2,8								23,73		0,65		-20,41		11,50																												
	min n-xy		zugeh. m-xy								zugeh. v-y		x		y		z																												
gelenkig	-40,65		0,76								0,30		-5,81		-22,52		9,97																												
steif	-6,84		-1,75								8,42		-3,90		-22,63		10,89																												

## B.2.2 Fläche 027

Tab. B.8: Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 027 in x-Richtung

Grundschnittgrößen in x-Richtung

Fläche Nr. 027

	[no-col]				9	7				1	2	3	
	max m-x				zugeh. n-x		zugeh. v-x		x	y	z		
gelenkig	22,51				-35,42		38,49		19,37	-20,22	1,98		
steif	2,08				-53,17		-1,31		14,79	-18,42	5,47		
	min m-x				zugeh. n-x		zugeh. v-x		x	y	z		
gelenkig	-5,38				223,35		72,84		14,55	-18,12	5,79		
steif	-3,44				37,28		-1,86		19,68	-19,00	2,61		
	[no-col]				4	7				1	2	3	
	max n-x				zugeh. m-x		zugeh. v-x		x	y	z		
gelenkig	460,05				-0,62		-58,23		19,68	-19,00	2,61		
steif	37,28				-3,44		-1,86		19,68	-19,00	2,61		
	min n-x				zugeh. m-x		zugeh. v-x		x	y	z		
gelenkig	-35,42				22,51		38,49		19,37	-20,22	1,98		
steif	-101,53				1,98		-2,34		14,55	-18,12	5,79		
	[no-col]				6	4	9	11	7	1	2	3	
	max v-x		zugeh. m-xy		zugeh. m-x		zugeh. n-x		zugeh. n-xy		x	y	z
gelenkig	72,84		-1,07		-5,38		223,35		-68,92		14,55	-18,12	5,79
steif	0,12		0,36		1,74		10,73		-6,49		17,63	-19,62	3,25
	min v-x		zugeh. m-xy		zugeh. m-x		zugeh. n-x		zugeh. n-xy		x	y	z
gelenkig	-58,23		1,74		-0,62		460,05		-257,94		19,68	-19,00	2,61
steif	-5,22		-0,14		-0,84		-17,90		-7,40		18,58	-18,39	3,57
	max m-xy				zugeh. n-xy				zugeh. v-x		x	y	z
gelenkig	6,82				-170,47				-10,97		18,81	-18,70	3,25
steif	0,63				-9,75				-1,23		15,66	-18,72	4,84
	min m-xy				zugeh. n-xy				zugeh. v-x		x	y	z
gelenkig	-7,49				-35,63				10,76		17,94	-18,40	3,88
steif	-0,94				-35,17				-1,86		19,68	-19,00	2,61
	max n-xy		zugeh. m-xy		zugeh. v-x				x	y	z		
gelenkig	1,18		0,77		26,38				17,63	-19,62	3,25		
steif	3,47		0,06		-2,78				19,37	-20,22	1,98		
	min n-xy		zugeh. m-xy		zugeh. v-x				x	y	z		
gelenkig	-257,94		1,74		-58,23				19,68	-19,00	2,61		
steif	-35,17		-0,94		-1,86				19,68	-19,00	2,61		



Tab. B.9: Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 027 in y-Richtung

Grundschnittgrößen in y-Richtung

Fläche Nr. 027

	[no-col]				10		8		1		2		3	
	max m-y				zugeh. n-y		zugeh. v-y		x		y		z	
gelenkig	2,13				0,27		3,37		15,66		-18,72		4,84	
steif	3,18				14,96		0,43		14,55		-18,12		5,79	
	min m-y				zugeh. n-y		zugeh. v-y		x		y		z	
gelenkig	-15,27				258,95		14,07		18,58		-18,39		3,57	
steif	-4,07				20,69		-6,22		19,68		-19,00		2,61	
	[no-col]				5		8		1		2		3	
	max n-y				zugeh. m-y		zugeh. v-y		x		y		z	
gelenkig	258,95				-15,27		14,07		18,58		-18,39		3,57	
steif	45,97				-2,25		-1,26		18,58		-18,39		3,57	
	min n-y				zugeh. m-y		zugeh. v-y		x		y		z	
gelenkig	-14,77				-0,83		0,75		17,55		-18,71		3,88	
steif	-7,10				-0,98		-4,19		17,31		-18,40		4,20	
	[no-col]				6		5		10		11		8	
	max v-y		zugeh. m-xy		zugeh. m-y		zugeh. n-y		zugeh. n-xy		x		y	
gelenkig	31,16		1,74		-1,89		126,77		-257,94		19,68		-19,00	
steif	0,43		0,10		3,18		14,96		-15,64		14,55		-18,12	
	min v-y		zugeh. m-xy		zugeh. m-y		zugeh. n-y		zugeh. n-xy		x		y	
gelenkig	-64,39		-1,36		-10,9		37,59		-40,17		19,37		-20,22	
steif	-6,57		-0,61		-1,17		-0,19		-9,45		20,64		-20,21	
	max m-xy				zugeh. n-xy		zugeh. v-y		x		y		z	
gelenkig	6,82				-170,47		-0,78		18,81		-18,70		3,25	
steif	0,63				-9,75		-4,52		15,66		-18,72		4,84	
	min m-xy				zugeh. n-xy		zugeh. v-y		x		y		z	
gelenkig	-7,49				-35,63		3,48		17,94		-18,40		3,88	
steif	-0,94				-35,17		-6,22		19,68		-19,00		2,61	
	max n-xy		zugeh. m-xy		zugeh. v-y		x		y		z			
gelenkig	1,18		0,77		-4,03		17,63		-19,62		3,25			
steif	3,47		0,06		-2,12		19,37		-20,22		1,98			
	min n-xy		zugeh. m-xy		zugeh. v-y		x		y		z			
gelenkig	-257,94		1,74		31,16		19,68		-19,00		2,61			
steif	-35,17		-0,94		-6,22		19,68		-19,00		2,61			

### B.2.3 Fläche 134

Tab. B.10: Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 134 in x-Richtung

Grundschnittgrößen in x-Richtung

Fläche Nr. 134

	[no-col]			9	7	1	2	3
	max m-x		zugeh. n-x		zugeh. v-x		x	y z
gelenkig	2,50		4,14		0,83		1,54	-2,03 11,50
steif	1,71		1,54		-1,83		5,77	-2,09 9,67
	min m-x		zugeh. n-x		zugeh. v-x		x	y z
gelenkig	-2,85		-105,01		0,53		-0,92	-0,31 11,50
steif	-2,12		63,03		-0,17		0,72	-1,46 11,50
	[no-col]			4	7	1	2	3
	max n-x		zugeh. m-x		zugeh. v-x		x	y z
gelenkig	37,11		-1,24		0,08		0,72	-1,46 11,50
steif	63,03		-2,12		-0,17		0,72	-1,46 11,50
	min n-x		zugeh. m-x		zugeh. v-x		x	y z
gelenkig	-148,55		0,02		5,32		-1,33	-0,02 11,50
steif	-147,62		-5,28		-14,78		-1,33	-0,02 11,50
	[no-col]			6	4	9	11	7 1 2 3
	max v-x	zugeh. m-xy	zugeh. m-x	zugeh. n-x	zugeh. n-xy	x	y z	
gelenkig	7,91	-1,74	0,09	-126,97	-4,66	0,35	-0,23 10,89	
steif	2,70	0,71	-1,70	-32,17	-20,90	3,22	-2,24 10,89	
	min v-x	zugeh. m-xy	zugeh. m-x	zugeh. n-x	zugeh. n-xy	x	y z	
gelenkig	-4,36	-0,11	0,43	-59,32	6,91	1,40	-0,48 10,58	
steif	-14,78	-0,31	-5,28	-147,62	-137,93	-1,33	-0,02 11,50	
	max m-xy		zugeh. n-xy		zugeh. v-x		x	y z
gelenkig	1,84		-11,83		3,46		1,13	-1,74 11,50
steif	0,71		-20,90		2,70		3,22	-2,24 10,89
	min m-xy		zugeh. n-xy		zugeh. v-x		x	y z
gelenkig	-1,74		-4,66		7,91		0,35	-0,23 10,89
steif	-0,87		-41,72		-2,31		-0,92	-0,31 11,50
	max n-xy	zugeh. m-xy		zugeh. v-x		x	y z	
gelenkig	18,44	-0,34		0,60		-0,28	-0,27 11,19	
steif	1,27	-0,16		1,46		2,86	-1,02 10,28	
	min n-xy	zugeh. m-xy		zugeh. v-x		x	y z	
gelenkig	-39,71	0,65		0,08		0,72	-1,46 11,50	
steif	-137,93	-0,31		-14,78		-1,33	-0,02 11,50	

Tab. B.11: Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 134 in y-Richtung

Grundschnittgrößen in y-Richtung

Fläche Nr. 134

	[no-col]					10		8		1		2		3		
	max m-y					zugeh. n-y		zugeh. v-y		x		y		z		
gelenkig	1,64					6,43		-1,14		-0,51		-0,59		11,50		
steif	2,06					-18,97		2,74		5,77		-2,09		9,67		
	min m-y					zugeh. n-y		zugeh. v-y		x		y		z		
gelenkig	-1,69					24,69		-5,30		1,54		-2,03		11,50		
steif	-5,28					-110,27		-2,66		-1,33		-0,02		11,50		
	[no-col]					5		8		1		2		3		
	max n-y					zugeh. m-y		zugeh. v-y		x		y		z		
gelenkig	94,53					-0,85		1,53		1,13		-1,74		11,50		
steif	40,07					-1,08		-3,82		1,13		-1,74		11,50		
	min n-y					zugeh. m-y		zugeh. v-y		x		y		z		
gelenkig	-7,59					0,24		0,13		2,40		-1,67		10,89		
steif	-110,27					-5,28		-2,66		-1,33		-0,02		11,50		
	[no-col]					6		5		10		11		8		
	max v-y		zugeh. m-xy		zugeh. m-y		zugeh. n-y		zugeh. n-xy		x		y		z	
gelenkig	2,41		-1,74		0,25		39,55		-4,66		0,35		-0,23		10,89	
steif	2,74		-0,10		2,06		-18,97		-21,88		5,77		-2,09		9,67	
	min v-y		zugeh. m-xy		zugeh. m-y		zugeh. n-y		zugeh. n-xy		x		y		z	
gelenkig	-5,30		-0,11		-1,69		24,69		6,19		1,54		-2,03		11,50	
steif	-4,39		-0,52		-2,20		13,75		-21,56		0,72		-1,46		11,50	
	max m-xy					zugeh. n-xy		zugeh. v-y		x		y		z		
gelenkig	1,84					-11,83		1,53		1,13		-1,74		11,50		
steif	0,71					-20,90		-3,77		3,22		-2,24		10,89		
	min m-xy					zugeh. n-xy		zugeh. v-y		x		y		z		
gelenkig	-1,74					-4,66		2,41		0,35		-0,23		10,89		
steif	-0,87					-41,72		-4,21		-0,92		-0,31		11,50		
	max n-xy		zugeh. m-xy				zugeh. v-y		x		y		z			
gelenkig	18,44		-0,34				-2,49		-0,28		-0,27		11,19			
steif	1,27		-0,16				-1,88		2,86		-1,02		10,28			
	min n-xy		zugeh. m-xy				zugeh. v-y		x		y		z			
gelenkig	-39,71		0,65				2,07		0,72		-1,46		11,50			
steif	-66,64		-0,7				-3,51		0,35		-0,23		10,89			

## B.2.4 Fläche 139

Tab. B.12: Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 139 in x-Richtung

Grundschnittgrößen in x-Richtung

Fläche Nr. 139

	[no-col]			9		7		1		2		3		
	max m-x			zugeh. n-x		zugeh. v-x		x		y		z		
gelenkig	1,86			-146,81		-23,28		14,55		0,00		5,79		
steif	1,48			-101,28		1,09		14,55		0,00		5,79		
	min m-x			zugeh. n-x		zugeh. v-x		x		y		z		
gelenkig	-1,69			-130,80		-1,61		20,64		-2,09		1,34		
steif	-1,25			-15,87		0,68		19,68		-0,88		2,61		
	[no-col]			4		7		1		2		3		
	max n-x			zugeh. m-x		zugeh. v-x		x		y		z		
gelenkig	-7,76			-0,08		3,09		19,68		-0,88		2,61		
steif	-15,87			-1,25		0,68		19,68		-0,88		2,61		
	min n-x			zugeh. m-x		zugeh. v-x		x		y		z		
gelenkig	-146,81			1,86		-23,28		14,55		0,00		5,79		
steif	-127,53			-2,14		-2,18		20,64		-2,09		1,34		
	[no-col]			6		4		9		11		7		
	max v-x		zugeh. m-xy		zugeh. m-x		zugeh. n-x		zugeh. n-xy		x		y	
gelenkig	9,44		0,87		0,62		-73,10		1,11		14,79		-0,30	
steif	1,23		0,06		0,66		-79,13		-1,91		14,79		-0,30	
	min v-x		zugeh. m-xy		zugeh. m-x		zugeh. n-x		zugeh. n-xy		x		y	
gelenkig	-23,28		0,34		1,86		-146,81		0,52		14,55		0,00	
steif	-2,64		0,24		-0,42		-37,44		5,32		18,58		-0,27	
	max m-xy						zugeh. n-xy		zugeh. v-x		x		y	
gelenkig	1,38						-4,50		-3,49		18,58		-0,27	
steif	0,26						5,45		-0,31		16,29		-0,60	
	min m-xy						zugeh. n-xy		zugeh. v-x		x		y	
gelenkig	-1,89						-6,23		-14,73		19,37		-2,10	
steif	-0,37						4,48		0,45		20,16		-1,48	
	max n-xy		zugeh. m-xy						zugeh. v-x		x		y	
gelenkig	20,31		-0,98						-1,61		20,64		-2,09	
steif	13,44		0,13						-0,94		18,18		-0,58	
	min n-xy		zugeh. m-xy						zugeh. v-x		x		y	
gelenkig	-6,97		0,07						0,01		19,05		-0,88	
steif	-5,81		-0,32						0,68		19,68		-0,88	

Tab. B.13: Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 139 in y-Richtung

Grundschnittgrößen in y-Richtung

Fläche Nr. 139

	[no-col]					10	8	1	2	3			
	max m-y		zugeh. n-y		zugeh. v-y		x	y	z				
gelenkig	1,38		40,58		6,60		19,37	-2,10	1,98				
steif	3,11		16,57		9,87		14,55	0,00	5,79				
	min m-y		zugeh. n-y		zugeh. v-y		x	y	z				
gelenkig	-0,53		7,44		-0,90		14,79	-0,30	5,47				
steif	-1,96		8,17		4,59		20,64	-2,09	1,34				
	[no-col]					5	8	1	2	3			
	max n-y		zugeh. m-y		zugeh. v-y		x	y	z				
gelenkig	44,42		-0,35		-1,79		18,58	-0,27	3,57				
steif	40,23		-0,80		-1,19		18,58	-0,27	3,57				
	min n-y		zugeh. m-y		zugeh. v-y		x	y	z				
gelenkig	-4,49		0,02		0,32		17,16	-0,90	3,88				
steif	-4,75		-0,25		-1,72		17,31	-0,28	4,20				
	[no-col]					6	5	10	11	8	1	2	3
	max v-y		zugeh. m-xy	zugeh. m-y	zugeh. n-y	zugeh. n-xy	x	y	z				
gelenkig	6,60		-1,89	1,38	40,58	-6,23	19,37	-2,10	1,98				
steif	9,87		0,01	3,11	16,57	-0,48	14,55	0,00	5,79				
	min v-y		zugeh. m-xy	zugeh. m-y	zugeh. n-y	zugeh. n-xy	x	y	z				
gelenkig	-3,63		-0,02	0,09	10	-5,8	19,68	-0,88	2,61				
steif	-3,27		-0,32	-1,33	10,59	-5,81	19,68	-0,88	2,61				
	max m-xy				zugeh. n-xy	zugeh. v-y	x	y	z				
gelenkig	1,38				-4,5	-1,79	18,58	-0,27	3,57				
steif	0,26				5,45	-0,40	16,29	-0,60	4,52				
	min m-xy				zugeh. n-xy	zugeh. v-y	x	y	z				
gelenkig	-1,89				-6,23	6,6	19,37	-2,10	1,98				
steif	-0,37				4,48	-0,82	20,16	-1,48	1,98				
	max n-xy		zugeh. m-xy		zugeh. v-y		x	y	z				
gelenkig	20,31		-0,98		1,98		20,64	-2,09	1,34				
steif	13,44		0,13		-0,77		18,18	-0,58	3,57				
	min n-xy		zugeh. m-xy		zugeh. v-y		x	y	z				
gelenkig	-6,97		0,07		-1,08		19,05	-0,88	2,93				
steif	-5,81		-0,32		-3,27		19,68	-0,88	2,61				

## B.3 Nachweistabellen

### B.3.1 Fläche 007, gelenkige Verbindungen

Tab. B.14: Nachweistabelle für m-x in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung

Moment	Faserrichtung parallel Schicht 1 (unten)			Faserrichtung senkrecht Schicht 2 (mitte)			Faserrichtung parallel Schicht 3 (oben)		
	$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_y$ [kN]	$z$ [mm]	$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_y$ [kN]	$z$ [mm]	$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_y$ [kN]	$z$ [mm]
	8462	13221,15	75	0	21153,85	25	8462	13221,15	-25
	25			0	21230,77	0			
					21153,85	-25			
max m-x [kNm/m] 5,86	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,62	0,54	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,54	-1,62
zugehörig n-x [kN/m] -620,68	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-6,21	-6,21	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-6,21	-6,21
zugehörig V-x [kN/m] 1,69	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,01	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,02	0,02	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,00
	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	1,08	1,08	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	-1,08	-1,08
	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	-6,21	-6,21	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	-6,21	-6,21
	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	-5,12	-5,12	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	-7,29	-7,29
	$\sigma_m$ (m)	0,54	-0,54	$\tau_{xz}$ (V <sub>d</sub> )	0,02	0,02	$\sigma_m$ (m)	0,54	-0,54
	$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,d}$	0,35	0,35	$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,d}$	0,00	0,00	$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,d}$	0,50	0,50
	$\sigma_m / f_{m,d}$	0,03	0,03	$\tau_{R,d} / f_{R,d}$	0,02	0,02	$\sigma_m / f_{m,d}$	0,03	0,03
	$\Sigma$	0,39	0,39	$\Sigma$	0,02	0,02	$\Sigma$	0,53	0,53
	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,62	0,54	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,54	-1,62
	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-6,21	-6,21	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-6,21	-6,21
	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	-0,56	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,89	-0,90	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,56	0,00
min m-x [kNm/m] -30,83	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	1,08	1,08	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	-1,08	-1,08
zugehörig n-x [kN/m] 82,26	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	-6,21	-6,21	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	-6,21	-6,21
zugehörig V-x [kN/m] -96,68	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	-5,12	-5,12	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	-7,29	-7,29
	$\sigma_m$ (m)	0,54	-0,54	$\tau_{xz}$ (V <sub>d</sub> )	-0,89	-0,90	$\sigma_m$ (m)	0,54	-0,54
	$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,d}$	0,35	0,35	$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,d}$	0,00	0,00	$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,d}$	0,50	0,50
	$\sigma_m / f_{m,d}$	0,03	0,03	$\tau_{R,d} / f_{R,d}$	1,29	1,29	$\sigma_m / f_{m,d}$	0,03	0,03
	$\Sigma$	0,39	0,39	$\Sigma$	1,29	1,29	$\Sigma$	0,53	0,53

Tab. B.15: Nachweistabelle für m-y in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung

Moment			Faserrichtung Schicht		senkrecht 1 (unten)		Faserrichtung Schicht			parallel 2 (mitte)		Faserrichtung Schicht		senkrecht 3 (oben)	
			E <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		285	285	E <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		7308	7308	7308	E <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		285	285
			ES <sub>y</sub> [kN]		0	445	ES <sub>y</sub> [kN]		712	2995	712	ES <sub>y</sub> [kN]		445	0
			z [mm]		75	25	z [mm]		25	0	-25	z [mm]		-25	-75
max m-y [kNm/m] 14,09			σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		2,24	0,75	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		19,17	0,00	-19,17	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		-0,75	-2,24
zugehörig n-y [kN/m] 23,03			σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,02	0,02	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,43	0,43	0,43	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,02	0,02
zugehörig v-y [kN/m] -11,70			τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,00	-0,04	τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		-0,06	-0,26	-0,06	τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		-0,04	0,00
			σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)		2,24	0,75	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)		0,00	0,00	0,00	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)		-0,75	-2,24
			σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (n)		0,02	0,02	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (n)		0,43	0,43	0,43	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (n)		0,02	0,02
			σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub>		2,26	0,76	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub>		0,43	0,43	0,43	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub>		-0,73	-2,22
			τ <sub>yz</sub> (q <sub>y</sub> )		0,00	-0,04	σ <sub>m</sub> (m)		19,17	0,00	-19,17	τ <sub>yz</sub> (q <sub>y</sub> )		-0,04	0,00
			σ <sub>c/t,0</sub> /f <sub>c/t,d</sub>		8,15	2,76	σ <sub>c/t,0</sub> /f <sub>c/t,d</sub>		0,05	0,05	0,05	σ <sub>c/t,0</sub> /f <sub>c/t,d</sub>		0,42	1,28
			τ <sub>R,0</sub> /f <sub>R,d</sub>		0,00	0,06	σ <sub>m</sub> /f <sub>m,d</sub>		1,38	0,00	1,38	τ <sub>R,0</sub> /f <sub>R,d</sub>		0,06	0,00
			Σ		8,15	2,81	Σ		1,44	0,05	1,44	Σ		0,48	1,28
			min m-y [kNm/m] -0,20			σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		-0,03	-0,01	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		-0,27	0,00	0,27	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,00				0,00	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,03	0,03	0,03	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,00	0,00
τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,00				0,04	τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,06	0,25	0,06	τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,04	0,00
						σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)		-0,03	-0,01	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)		0,00	0,00	0,00	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)
			σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (n)		0,00	0,00	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (n)		0,03	0,03	0,03	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (n)		0,00	0,00
			σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub>		-0,03	-0,01	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub>		0,03	0,03	0,03	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub>		0,01	0,03
			τ <sub>yz</sub> (q <sub>y</sub> )		0,00	0,04	σ <sub>m</sub> (m)		-0,27	0,00	0,27	τ <sub>yz</sub> (q <sub>y</sub> )		0,04	0,00
			σ <sub>c/t,0</sub> /f <sub>c/t,d</sub>		0,02	0,01	σ <sub>c/t,0</sub> /f <sub>c/t,d</sub>		0,00	0,00	0,00	σ <sub>c/t,0</sub> /f <sub>c/t,d</sub>		0,04	0,12
			τ <sub>R,0</sub> /f <sub>R,d</sub>		0,00	0,05	σ <sub>m</sub> /f <sub>m,d</sub>		0,02	0,00	0,02	τ <sub>R,0</sub> /f <sub>R,d</sub>		0,05	0,00
			Σ		0,02	0,06	Σ		0,02	0,00	0,02	Σ		0,10	0,12
						σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		-6,24	-6,24	σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,00	0,00	0,00	σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,55				0,18	σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,00	0,00	0,00	σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		-0,18	-0,55
τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,00				0,01	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,01	0,01	0,01	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		0,01	0,00
σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)		0,37				0,37	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)		0,00	0,00	0,00	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)		-0,37	-0,37

Tab. B.16: Nachweistabelle für n-x in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung

Normalkraft			parallel 1 (unten)		senkrecht 2 (mitte)				parallel 3 (oben)						
			Schicht		Schicht				Schicht						
			$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8462	8462	$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0	0	0	$E_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8462	8462			
			$ES_x$ [kN]	0,00	13221	$ES_x$ [kN]	21154	21231	21154	$ES_x$ [kN]	13221	0			
			$z$ [mm]	75	25	$z$ [mm]	25	0	-25	$z$ [mm]	-25	-75			
max n-x [kN/m] 242,18			$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,42	2,42	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,42	2,42			
zugehörig	m-x [kNm/m] 1,72		$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,48	0,16	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,16	-0,48			
zugehörig	V-x [kN/m] -2,05		$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	-0,01	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,02	-0,02	-0,02	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,01	0,00			
			$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,32	0,32	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,00	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	-0,32	-0,32			
			$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	2,42	2,42	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	0,00	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	2,42	2,42			
			$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	2,74	2,74	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	0,00	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	2,10	2,10			
			$\sigma_m$ (m)	0,16	-0,16	$\tau_{xz} (V_x)$	-0,02	-0,02	-0,02	$\sigma_m$ (m)	0,16	-0,16			
			$\sigma_{c/t,0}/f_{c/t,d}$	0,28	0,28	$\sigma_{c/t,0}/f_{c/t,d}$	0,00	0,00	0,00	$\sigma_{c/t,0}/f_{c/t,d}$	0,22	0,22			
			$\sigma_m/f_{m,d}$	0,01	0,01	$\tau_{R,0}/f_{R,d}$	0,03	0,03	0,03	$\sigma_m/f_{m,d}$	0,01	0,01			
			$\Sigma$	0,29	0,29	$\Sigma$	0,03	0,03	0,03	$\Sigma$	0,23	0,23			
			min n-x [kN/m] -624,32			$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-6,24	-6,24	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-6,24	-6,24
			zugehörig	m-x [kNm/m] 2,00		$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,55	0,18	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,18	-0,55
			zugehörig	V-x [kN/m] 1,56		$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,01	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,01	0,01	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,00
			$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,37	0,37	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,00	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	-0,37	-0,37			
			$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	-6,24	-6,24	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	0,00	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	-6,24	-6,24			
			$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	-5,87	-5,87	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	0,00	0,00	0,00	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	-6,61	-6,61			
			$\sigma_m$ (m)	0,18	-0,18	$\tau_{xz} (V_x)$	0,01	0,01	0,01	$\sigma_m$ (m)	0,18	-0,18			
			$\sigma_{c/t,0}/f_{c/t,d}$	0,40	0,40	$\sigma_{c/t,0}/f_{c/t,d}$	0,00	0,00	0,00	$\sigma_{c/t,0}/f_{c/t,d}$	0,45	0,45			
			$\sigma_m/f_{m,d}$	0,01	0,01	$\tau_{R,0}/f_{R,d}$	0,02	0,02	0,02	$\sigma_m/f_{m,d}$	0,01	0,01			
			$\Sigma$	0,42	0,42	$\Sigma$	0,02	0,02	0,02	$\Sigma$	0,47	0,47			

Tab. B.17: Nachweistabelle für n-y in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung

Normalkraft			Faserrichtung Schicht 1 (unten)		Faserrichtung Schicht 2 (mitte)			Faserrichtung Schicht 3 (oben)		
			senkrecht		parallel			senkrecht		
			1 (unten)		2 (mitte)			3 (oben)		
	$E_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	285	285	$E_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	7308	7308	7308	$E_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	285	285
	$ES_y$ [kN]	0	445	$ES_y$ [kN]	712	2995	712	$ES_y$ [kN]	445	0
	$z$ [mm]	75	25	$z$ [mm]	25	0	-25	$z$ [mm]	-25	-75
	<b>max n-y [kN/m]</b>	<b>44,03</b>		$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,03	0,03	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,82	0,82	0,82
zugehörig	m-y [kNm/m]	0,27		$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,04	0,01	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,37	0,00	-0,37
zugehörig	v-y [kN/m]	-0,70		$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	-0,02	0,00
				$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,04	0,01	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,00	0,00	0,00
				$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	0,03	0,03	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	0,82	0,82	0,82
				$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	<b>0,07</b>	<b>0,05</b>	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	<b>0,82</b>	<b>0,82</b>	<b>0,82</b>
				$\tau_{yz} (q_y)$	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	$\sigma_m$ (m)	<b>0,37</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,37</b>
				$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,0}$	0,27	0,17	$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,0}$	0,10	0,10	0,10
				$\tau_{R,0} / f_{R,0}$	0,00	0,00	$\sigma_m / f_{m,0}$	0,03	0,00	0,03
				$\Sigma$	<b>0,27</b>	<b>0,17</b>	$\Sigma$	<b>0,12</b>	<b>0,10</b>	<b>0,12</b>
	<b>min n-y [kN/m]</b>	<b>-96,61</b>		$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,07	-0,07	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-1,79	-1,79	-1,79
zugehörig	m-y [kNm/m]	0,41		$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,07	0,02	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,56	0,00	-0,56
zugehörig	v-y [kN/m]	0,95		$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,02	0,01
				$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,07	0,02	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (m)	0,00	0,00	0,00
				$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	-0,07	-0,07	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$ (n)	-1,79	-1,79	-1,79
				$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	$\sigma_{c,0} / \sigma_{t,0}$	<b>-1,79</b>	<b>-1,79</b>	<b>-1,79</b>
				$\tau_{yz} (q_y)$	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	$\sigma_m$ (m)	<b>0,56</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,56</b>
				$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,0}$	0,00	0,03	$\sigma_{c/t,0} / f_{c/t,0}$	0,14	0,14	0,14
				$\tau_{R,0} / f_{R,0}$	0,00	0,00	$\sigma_m / f_{m,0}$	0,04	0,00	0,04
				$\Sigma$	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	$\Sigma$	<b>0,18</b>	<b>0,14</b>	<b>0,18</b>

Tab. B.18: Nachweistabelle für v-x in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung

Querkraft			Faserrichtung parallel Schicht 1 (unten)			Faserrichtung senkrecht Schicht 2 (mitte)			Faserrichtung parallel Schicht 3 (oben)			
			E <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]			E <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]			E <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]			
			E <sub>S</sub> [kN]			E <sub>S</sub> [kN]			E <sub>S</sub> [kN]			
			G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]			G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]			G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]			
			z [mm]			z [mm]			z [mm]			
max v-x [kN/m] 20,46			τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,12	σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,19	0,19	0,19	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,12	0,00
zugehörig	m-x [kNm/m]	-22,55				σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00			
zugehörig	n-x [kN/m]	81,37				σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00			
zugehörig	m-xy [kNm/m]	-10,94	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-1,97	-0,66					τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,66	1,97
zugehörig	n-xy [kN/m]	21,93	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,21	0,21					τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,21	0,21
			τ <sub>xy</sub> (m-xy)	-1,97	-0,66	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)	0,00	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub> (m-xy)	0,66	1,97
			τ <sub>xy</sub> (n-xy)	0,21	0,21	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (n)	0,00	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub> (n-xy)	0,21	0,21
			τ <sub>xy</sub>	-1,76	-0,44	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub>	0,00	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub>	0,87	2,18
			τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	0,00	0,12	τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	0,19	0,19	0,19	τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	0,12	0,00
			(τ <sub>xz</sub> /f <sub>t,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,00	0,00	σ <sub>c,t,d</sub> /f <sub>c,t,d</sub>	0,00	0,00	0,00	(τ <sub>xz</sub> /f <sub>t,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,00	0,00
			(τ <sub>xy</sub> /f <sub>t,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,88	0,06	τ <sub>xy</sub> /f <sub>R,d</sub>	0,27	0,27	0,27	(τ <sub>xy</sub> /f <sub>t,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,22	1,36
			Σ	0,88	0,06	Σ	0,27	0,27	0,27	Σ	0,22	1,36
min v-x [kN/m] -96,68			τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	-0,56	σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,89	-0,90	-0,89	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,56	0,00
zugehörig	m-x [kNm/m]	-30,83				σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00			
zugehörig	n-x [kN/m]	82,26				σ <sub>x</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00			
zugehörig	m-xy [kNm/m]	8,28	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	1,49	0,50					τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,50	-1,49
zugehörig	n-xy [kN/m]	52,80	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,51	0,51					τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,51	0,51
			τ <sub>xy</sub> (m-xy)	1,49	0,50	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (m)	0,00	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub> (m-xy)	-0,50	-1,49
			τ <sub>xy</sub> (n-xy)	0,51	0,51	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub> (n)	0,00	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub> (n-xy)	0,51	0,51
			τ <sub>xy</sub>	2,00	1,01	σ <sub>c,0</sub> / σ <sub>t,0</sub>	0,00	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub>	0,02	-0,98
			τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	0,00	-0,56	τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	-0,89	-0,90	-0,89	τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	-0,56	0,00
			(τ <sub>xz</sub> /f <sub>t,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,00	0,09	σ <sub>c,t,d</sub> /f <sub>c,t,d</sub>	0,00	0,00	0,00	(τ <sub>xz</sub> /f <sub>t,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,09	0,00
			(τ <sub>xy</sub> /f <sub>t,d</sub> ) <sup>2</sup>	1,15	0,29	τ <sub>xy</sub> /f <sub>R,d</sub>	1,29	1,29	1,29	(τ <sub>xy</sub> /f <sub>t,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,00	0,27
			Σ	1,15	0,38	Σ	1,29	1,29	1,29	Σ	0,09	0,27



Tab. B.19: Nachweistabelle für v-y in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung

Querkraft	Faserrichtung Schicht E <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] E <sub>S</sub> [kN] G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] z [mm]			senkrecht 1 (unten) 285 0 531 75	285 445 531 25	Faserrichtung Schicht E <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] E <sub>S</sub> [kN] G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] z [mm]			parallel 2 (mitte) 7308 712 454 25	7308 2995 454 0	-25	Faserrichtung Schicht E <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] E <sub>S</sub> [kN] G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] z [mm]	senkrecht 3 (oben) 285 445 531 -25	285 0 531 -75	
	max v-y [kN/m]	11,23	τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,04	τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,06	0,25	0,06	τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,04	0,00	τ <sub>yz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,04	0,00
	zugehörig m-y [kNm/m]	-0,20	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,03	-0,01	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,00	0,00	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,03	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,01	0,03
	zugehörig n-y [kN/m]	1,47	σ <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00
	zugehörig m-xy [kNm/m]	-0,09				τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,06	0,06	0,06						
zugehörig n-xy [kN/m]	7,72														

Tab. B.20: Nachweistabelle für m-xy in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung mit v-x

Drillmoment		Faserrichtung parallel Schicht 1 (unten)			Faserrichtung senkrecht Schicht 2 (mitte)			Faserrichtung parallel Schicht 3 (oben)					
		G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	531	531	G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	454	454	G <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	531	531			
		ES <sub>x</sub> [kN]	0	13221	ES <sub>x</sub> [kN]	21154	21231	21154	ES <sub>x</sub> [kN]	13221	0		
		z [mm]	75	25	z [mm]	25	0	-25	z [mm]	-25	-75		
max m-xy [kNm/m] 9,10		τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	1,64	0,55	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,47	0,00	-0,47	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,55	-1,64		
zugehörig	v-x [kN/m] -22,95	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	-0,13	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,21	-0,21	-0,21	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,13	0,00		
zugehörig	n-xy [kN/m] 48,88	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,48	0,48	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,41	0,41	0,41	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,48	0,48		
		τ <sub>xy</sub> (m-xy)	1,64	0,55	kein Nachweis gefordert			τ <sub>xy</sub> (m-xy)	-0,55	-1,64			
		τ <sub>xy</sub> (n-xy)	0,48	0,48				τ <sub>xy</sub> (n-xy)	0,48	0,48			
		τ <sub>xy</sub>	2,11	1,02				τ <sub>xy</sub>	-0,07	-1,16			
		τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	0,00	-0,13				τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	-0,13	0,00			
		(τ <sub>xz</sub> /f <sub>v,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,00	0,01				(τ <sub>xz</sub> /f <sub>v,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,01	0,00			
		(τ <sub>xy</sub> /f <sub>v,d</sub> ) <sup>2</sup>	1,28	0,30				(τ <sub>xy</sub> /f <sub>v,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,00	0,39			
		Σ	1,28	0,30				Σ	0,01	0,39			
min m-xy [kNm/m] -10,94	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]			-1,97	-0,66	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,56	0,00	0,56	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,66	1,97	
zugehörig	v-x [kN/m] 20,46			τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00	τ <sub>xz</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00
zugehörig	n-xy [kN/m] 21,93			τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,21	0,21	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,18	0,18	0,18	τ <sub>xy</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,21	0,21
				τ <sub>xy</sub> (m-xy)	-1,97	-0,66	kein Nachweis gefordert			τ <sub>xy</sub> (m-xy)	0,66	1,97	
				τ <sub>xy</sub> (n-xy)	0,21	0,21				τ <sub>xy</sub> (n-xy)	0,21	0,21	
				τ <sub>xy</sub>	-1,76	-0,44				τ <sub>xy</sub>	0,87	2,18	
				τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	0,00	0,00				τ <sub>xz</sub> (v <sub>x</sub> )	0,00	0,00	
		(τ <sub>xz</sub> /f <sub>v,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,00	0,00				(τ <sub>xz</sub> /f <sub>v,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,00	0,00			
		(τ <sub>xy</sub> /f <sub>v,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,88	0,06				(τ <sub>xy</sub> /f <sub>v,d</sub> ) <sup>2</sup>	0,22	1,36			
Σ	0,88	0,06				Σ	0,22	1,36					

Tab. B.21: Nachweistabelle für m-xy in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung mit v-y

Drillmoment			Faserrichtung senkrecht Schicht 1 (unten)			Faserrichtung parallel Schicht 2 (mitte)				Faserrichtung senkrecht Schicht 3 (oben)		
			$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	531	531	$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	454	454	454	$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	531	531
			$E S_y$ [kN]	0	445	$E S_y$ [kN]	712	2995	712	$E S_y$ [kN]	445	0
			$z$ [mm]	75	25	$z$ [mm]	25	0	-25	$z$ [mm]	-25	-75
max m-xy [kNm/m] 9,10			$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,64	0,55	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,47	0,00	-0,47	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,55	-1,64
zugehörig	v-y [kN/m] -5,40	$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	-0,02	$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,03	-0,12	-0,03	$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,02	0,00	
zugehörig	n-xy [kN/m] 48,88	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,48	0,48	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,41	0,41	0,41	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,48	0,48	
			kein Nachweis gefordert		$\tau_{xy}$ (m-xy)	0,47	0,00	-0,47	kein Nachweis gefordert			
					$\tau_{xy}$ (n-xy)	0,41	0,41	0,41				
					$\tau_{xy}$	0,87	0,41	-0,06				
					$\tau_{yz}$ ( $v_y$ )	-0,03	-0,12	-0,03				
					$(\tau_{yz}/f_{v,d})^2$	0,00	0,00	0,00				
					$(\tau_{xy}/f_{v,d})^2$	0,22	0,05	0,00				
					$\Sigma$	0,22	0,05	0,00				
min m-xy [kNm/m] -10,94			$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-1,97	-0,66	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,56	0,00	0,56	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,66	1,97
zugehörig	v-y [kN/m] -13,08	$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	0,00	$\tau_{yz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	
zugehörig	n-xy [kN/m] 21,93	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,21	0,21	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,18	0,18	0,18	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,21	0,21	
			kein Nachweis gefordert		$\tau_{xy}$ (m-xy)	-0,56	0,00	0,56	kein Nachweis gefordert			
					$\tau_{xy}$ (n-xy)	0,18	0,18	0,18				
					$\tau_{xy}$	-0,38	0,18	0,74				
					$\tau_{yz}$ ( $v_y$ )	0,00	0,00	0,00				
					$(\tau_{yz}/f_{v,d})^2$	0,00	0,00	0,00				
					$(\tau_{xy}/f_{v,d})^2$	0,04	0,01	0,16				
					$\Sigma$	0,04	0,01	0,16				

Tab. B.22: Nachweistabelle für n-xy in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung mit v-x

Schubkraft			Faserrichtung parallel			Faserrichtung senkrecht				Faserrichtung parallel								
			Schicht 1 (unten)			Schicht 2 (mitte)			Schicht 3 (oben)									
			$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	531	531	$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	454	454	454	$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	531	531						
			$ES_x$ [kN]	0	13221	$ES_x$ [kN]	21154	21231	21154	$ES_x$ [kN]	13221	0						
$z$ [mm]			75	25	$z$ [mm]			25	0	-25	$z$ [mm]			-25	-75			
max n-xy [kN/m] 59,79			$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,58	0,58	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,50	0,50	0,50	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,58	0,58						
zugehörig v-x [kN/m] -10,91			$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	-0,06	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,10	-0,10	-0,10	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,06	0,00						
zugehörig m-xy [kNm/m] 0,73			$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,13	0,04	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,04	0,00	-0,04	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,04	-0,13						
			$\tau_{xy}$ (m-xy)	0,13	0,04	kein Nachweis gefordert				$\tau_{xy}$ (m-xy)	-0,04	-0,13						
			$\tau_{xy}$ (n-xy)	0,58	0,58					$\tau_{xy}$ (n-xy)	0,58	0,58						
			$\tau_{xy}$	0,71	0,63					$\tau_{xy}$	0,54	0,45						
						$\tau_{xz} (v_x)$			0,00	-0,06				$\tau_{xz} (v_x)$			-0,06	0,00
						$(\tau_{xz}/f_{v,d})^2$			0,00	0,00				$(\tau_{xz}/f_{v,d})^2$			0,00	0,00
						$(\tau_{xy}/f_{v,d})^2$			0,15	0,11				$(\tau_{xy}/f_{v,d})^2$			0,08	0,06
						$\Sigma$			0,15	0,11				$\Sigma$			0,08	0,06
min n-xy [kN/m] -43,22			$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,42	-0,42	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,36	-0,36	-0,36	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,42	-0,42						
zugehörig v-x [kN/m] 5,06			$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,03	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,05	0,05	0,05	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,03	0,00						
zugehörig m-xy [kNm/m] -2,36			$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,42	-0,14	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,12	0,00	0,12	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,14	0,42						
			$\tau_{xy}$ (m-xy)	-0,42	-0,14	kein Nachweis gefordert				$\tau_{xy}$ (m-xy)	0,14	0,42						
			$\tau_{xy}$ (n-xy)	-0,42	-0,42					$\tau_{xy}$ (n-xy)	-0,42	-0,42						
			$\tau_{xy}$	-0,85	-0,56					$\tau_{xy}$	-0,28	0,00						
						$\tau_{xz} (v_x)$			0,00	0,03				$\tau_{xz} (v_x)$			0,03	0,00
						$(\tau_{xz}/f_{v,d})^2$			0,00	0,00				$(\tau_{xz}/f_{v,d})^2$			0,00	0,00
						$(\tau_{xy}/f_{v,d})^2$			0,20	0,09				$(\tau_{xy}/f_{v,d})^2$			0,02	0,00
						$\Sigma$			0,20	0,09				$\Sigma$			0,02	0,00

Tab. B.23: Nachweistabelle für n-xy in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung mit v-y

Schubkraft	Faserrichtung senkrecht Schicht 1 (unten)			Faserrichtung parallel Schicht 2 (mitte)			Faserrichtung senkrecht Schicht 3 (oben)		
	$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	531	531	$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	454	454	$G_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	531	531
	$ES_y$ [kN]	0	445	$ES_y$ [kN]	712	2995	$ES_y$ [kN]	445	0
	$z$ [mm]	75	25	$z$ [mm]	25	0	$z$ [mm]	-25	-75
max n-xy [kN/m] 59,79	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,58	0,58	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,50	0,50	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,58	0,58
zugehörig v-x [kN/m] -1,58	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	-0,01	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,01	-0,04	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,01	0,00
zugehörig m-xy [kNm/m] 0,73	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,13	0,04	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,04	0,00	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,04	-0,13
				$\tau_{xy}$ (m-xy)	0,04	0,00			
				$\tau_{xy}$ (n-xy)	0,50	0,50			
				$\tau_{xy}$	0,54	0,50			
				$\tau_{yz}$ ( $v_y$ )	-0,01	-0,04			
				$(\tau_{xz}/f_{v,d})^2$	0,00	0,00			
				$(\tau_{xy}/f_{v,d})^2$	0,08	0,07			
				$\Sigma$	0,08	0,07			
min n-xy [kN/m] -40,65	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,40	-0,40	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,34	-0,34	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,40	-0,40
zugehörig v-x [kN/m] 0,30	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,01	$\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,00	0,00
zugehörig m-xy [kNm/m] 0,76	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,14	0,05	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,04	0,00	$\tau_{xy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-0,05	-0,14
				$\tau_{xy}$ (m-xy)	0,04	0,00			
				$\tau_{xy}$ (n-xy)	-0,34	-0,34			
				$\tau_{xy}$	-0,30	-0,34			
				$\tau_{yz}$ ( $v_y$ )	0,00	0,01			
				$(\tau_{xz}/f_{v,d})^2$	0,00	0,00			
				$(\tau_{xy}/f_{v,d})^2$	0,03	0,03			
				$\Sigma$	0,03	0,03			

## B.3.2 Nachweise in den Vergleichsflächen

### B.3.2.1 Fläche 134

Tab. B.24: Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 134

Fläche: 134

x-Richtung

				Nachweispunkte im Querschnitt						
				1	2	3	4	5	6	7
gelenkig	maßgebende Schnittgröße	$m_x$	max	0,07	0,07	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04
			min	0,12	0,12	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05
		$n_x$	max	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07
			min	0,10	0,10	0,07	0,07	0,07	0,10	0,10
		$v_x$	max	0,04	0,01	0,11	0,11	0,11	0,00	0,02
			min	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00
		$m_{xy}$	max	0,01	0,00				0,01	0,06
			min	0,04	0,01				0,00	0,02
steif	maßgebende Schnittgröße	$m_x$	max	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
			min	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,12	0,12
		$n_x$	max	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,12	0,12
			min	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,06	0,06
		$v_x$	max	0,00	0,01	0,04	0,04	0,04	0,02	0,03
			min	0,56	0,53	0,20	0,20	0,20	0,50	0,47
		$m_{xy}$	max	0,00	0,01				0,02	0,03
			min	0,09	0,06				0,04	0,02
		$n_{xy}$	max	0,00	0,00				0,00	0,00
			min	0,56	0,53				0,50	0,47

Tab. B.25: Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in y-Richtung in Fläche 134

Fläche: 134

y-Richtung

				Nachweispunkte im Querschnitt						
				1	2	3	4	5	6	7
gelenkig	maßgebende Schnittgröße	$m_y$	max	0,96	0,34	0,18	0,01	0,18	0,05	0,15
			min	0,14	0,07	0,22	0,06	0,22	0,41	1,03
		$n_y$	max	0,04	0,09	0,29	0,21	0,29	0,42	0,73
			min	0,12	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
		$v_y$	max	0,25	0,15	0,07	0,02	0,03	0,06	0,01
			min	0,14	0,04	0,02	0,03	0,03	0,39	1,03
		$m_{xy}$	max			0,00	0,00	0,01		
			min			0,00	0,00	0,00		
steif	maßgebende Schnittgröße	$m_y$	max	1,13	0,36	0,23	0,03	0,23	0,08	0,20
			min	0,53	0,22	0,67	0,16	0,67	0,74	2,74
		$n_y$	max	0,08	0,03	0,20	0,09	0,20	0,33	0,72
			min	0,53	0,22	0,67	0,16	0,67	0,74	2,74
		$v_y$	max	1,13	0,34	0,10	0,10	0,09	0,07	0,20
			min	0,20	0,06	0,11	0,10	0,08	0,46	1,30
		$m_{xy}$	max			0,01	0,01	0,01		
			min			0,04	0,03	0,03		
		$n_{xy}$	max			0,00	0,00	0,00		
			min			0,10	0,09	0,08		

### B.3.2.2 Fläche 139

Tab. B.26: Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 139

Fläche: 139

x-Richtung

				Nachweispunkte im Querschnitt						
				1	2	3	4	5	6	7
gelenkig	maßgebende Schnittgröße	$m_x$	max	0,09	0,09	0,31	0,31	0,31	0,13	0,13
			min	0,12	0,12	0,02	0,02	0,02	0,08	0,08
		$n_x$	max	0,01	0,01	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00
			min	0,09	0,09	0,31	0,31	0,31	0,13	0,13
		$v_x$	max	0,01	0,00	0,13	0,13	0,13	0,00	0,01
			min	0,00	0,01	0,31	0,31	0,31	0,01	0,00
		$m_{xy}$	max	0,01	0,00				0,00	0,02
			min	0,05	0,01				0,00	0,02
$n_{xy}$	max	0,00	0,01				0,02	0,04		
	min	0,00	0,00				0,00	0,00		
				1	2	3	4	5	6	7
steif	maßgebende Schnittgröße	$m_x$	max	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,10	0,10
			min	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		$n_x$	max	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
			min	0,13	0,13	0,03	0,03	0,03	0,07	0,07
		$v_x$	max	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
			min	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00
		$m_{xy}$	max	0,00	0,00				0,00	0,00
			min	0,00	0,00				0,00	0,00
$n_{xy}$	max	0,01	0,01				0,00	0,00		
	min	0,00	0,00				0,00	0,00		

Tab. B.27: Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in y-Richtung in Fläche 139

Fläche: 139

y-Richtung

				Nachweispunkte im Querschnitt						
				1	2	3	4	5	6	7
gelenkig	maßgebende Schnittgröße	$m_y$	max	0,90	0,40	0,23	0,09	0,23	0,06	0,11
			min	0,05	0,02	0,07	0,02	0,07	0,13	0,32
		$n_y$	max	0,01	0,06	0,13	0,10	0,13	0,19	0,32
			min	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
		$v_y$	max	0,90	0,37	0,08	0,03	0,02	0,03	0,11
			min	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	0,01	0,00
		$m_{xy}$	max			0,00	0,00	0,00		
			min			0,01	0,00	0,00		
		$n_{xy}$	max			0,00	0,01	0,01		
			min			0,00	0,00	0,00		
				1	2	3	4	5	6	7
steif	maßgebende Schnittgröße	$m_y$	max	1,83	0,69	0,34	0,04	0,34	0,14	0,28
			min	0,18	0,08	0,21	0,02	0,21	0,42	1,15
		$n_y$	max	0,06	0,01	0,17	0,09	0,17	0,26	0,56
			min	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03	0,04	0,13
		$v_y$	max	1,83	0,64	0,00	0,02	0,00	0,09	0,28
			min	0,12	0,04	0,03	0,03	0,02	0,28	0,79
		$m_{xy}$	max			0,00	0,00	0,00		
			min			0,00	0,00	0,00		
		$n_{xy}$	max			0,00	0,00	0,00		
			min			0,00	0,00	0,00		

## C Verbindungsnachweise

### C.1 Verbindungslinie 021, gelenkige Verbindung

Tab. C.1: Eingabeformular für die Ermittlung der geometrischen Grundgrößen für Linie 021

#### Geometrische Eingangswerte

Linienbezeichnung:	021
Schnittwinkel zur Faserrichtung:	$\alpha =$ <input type="text" value="42,3"/> ° 0,738 rad
Gehrungswinkel der Platten:	$\beta =$ <input type="text" value="37,7"/> ° 0,658 rad
Plattendicke:	$d =$ <input type="text" value="150"/> [mm]

#### **Ergebnisse:**

Höhe der Gehrungsschnittkante:	$h =$ 190 [mm]
Verbleibende Dicke der Deckschicht:	$t_d =$ 41 [mm]
	$\Delta h' =$ 32 [mm]
Abstand der GS von der Spitze:	$h' =$ 158 [mm]
	$t =$ 204 [mm]
	$t' =$ 164 [mm]
Abstand der GS auf Plattenoberfläche:	$b =$ 258 [mm]
Mindestabstand vom Rand:	$a_{\min} =$ 284 [mm]

### C.1.1 Schnittgrößen

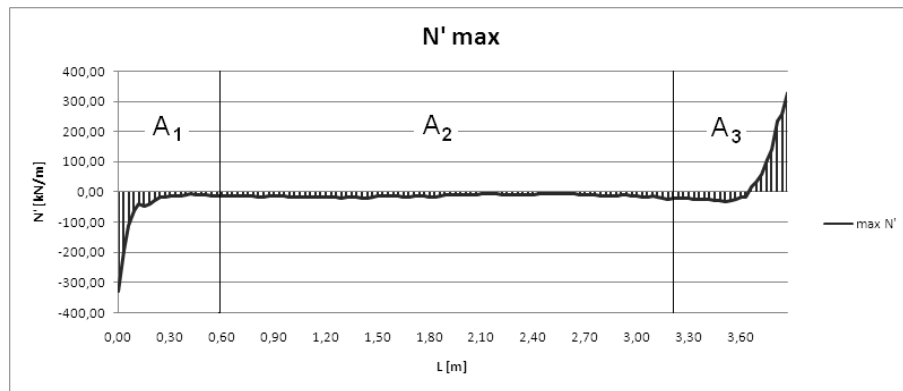


Abb. C.1: Verlauf  $N'$  in Liniengelenk 021 bei gelenkiger Ausführung

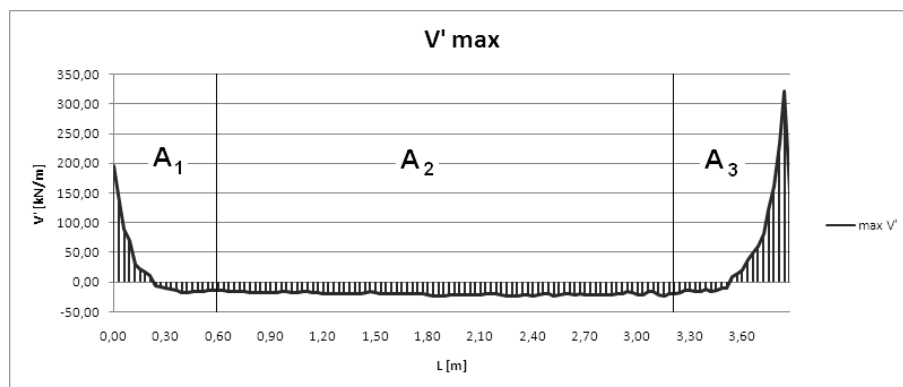


Abb. C.2: Verlauf  $V'$  in Liniengelenk 021 bei gelenkiger Ausführung

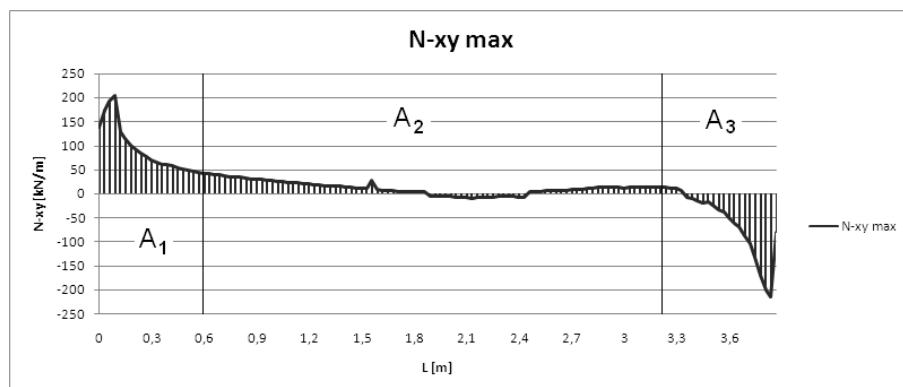


Abb. C.3: Verlauf  $N\text{-}xy$  in Liniengelenk 021 bei gelenkiger Ausführung

## C.1.2 Nachweistabellen

Tab. C.2: Verbindungsnachweis für Querkraft R im Randbereich A<sub>1</sub>

### Übertragung der Querkraftresultierenden R

Linienbezeichnung:	021	gelenkig	Bereich:	A1
--------------------	-----	----------	----------	----

Querkraftkomponente:  $V = 17,02$  [kN]

Schubkraftkomponente:  $N_{xy} = 57,64$  [kN]

Rohdichte:  $\rho_k = 380$  [kg/m<sup>3</sup>]

**Zwischenergebnisse:**

<b>Querkraftresultierende:</b>	<b>R = 60,10 [kN]</b>	
--------------------------------	-----------------------	--

Winkel zur VB-Längsachse:  $\varphi = 16,45$  [grad]  $0,287$  [rad]

$b = 0,173$   $c = 0,128$   $d = 0,117$

Richtungsvektor der Resultierenden:  $R = \begin{pmatrix} -0,774 \\ 0,593 \\ 0,224 \end{pmatrix}$   $||R|| = 1$

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_R = 140,67$  [grad]  $\theta_R = 39,33$  [grad]  $\theta_R = 0,686$  [rad]

**Parameter der Verbindungsausführung:**

Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 4,8$   $f_{u,k} = 400$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]*

Durchmesser Gewindestange:  $d = 28$  [mm]

Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 3$

Locheibungsfestigkeit:  $f_{h,0,k} = 22,44$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (202;204)]*

Locheibungsfestigkeit unter  $\varphi$ :  $f_{h,\varphi,k} = 17,79$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (203)]*

Fließmoment der Gewindestange:  $M_{y,k} = 694692$  [Nmm] *[DIN 1052:2004-08, (208)]*

**Bemessungsfestigkeiten der Verbindung mit einer Gewindestange:**

(G.1)  $R_d = 56395$  [N] *[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.2]*  
 (G.2)  $R_d = 56395$  [N]  
 (G.3)  $R_d = 23359$  [N]  
 (G.4)  $R_d = 23435$  [N]  
 (G.5)  $R_d = 23435$  [N]  
 (G.6)  $R_d = 21525$  [N]

minimale Verbindungsfestigkeit:  $\min R_d = 21525$  [N]

**gesamte Verbindungsfestigkeit:**

**$F_{Rd} = 64,57$  [kN]**

**$R = 60,10$  [kN]**



Tab. C.3: Verbindungsnachweis für Querkraft R im Mittelabschnitt A<sub>2</sub>

## Übertragung der Querkraftresultierenden R

Linienbezeichnung:	021	gelenkig	Bereich:	A2
--------------------	-----	----------	----------	----

 Querkraftkomponente:  $V = 54,51$  [kN]

 Schubkraftkomponente:  $N_{xy} = 38,11$  [kN]

 Rohdichte:  $\rho_k = 380$  [kg/m<sup>3</sup>]

**Zwischenergebnisse:**

<b>Querkraftresultierende:</b>	<b>R = 66,51 [kN]</b>	
--------------------------------	-----------------------	--

 Winkel zur VB-Längsachse:  $\gamma = 55,04$  [grad]  $0,961$  [rad]

 $b = 0,501$   $c = 0,371$   $d = 0,337$ 

 Richtungsvektor der Resultierenden:  $R = \begin{pmatrix} -0,756 \\ 0,086 \\ 0,648 \end{pmatrix}$   $||R|| = 1$ 

 Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_R = 139,14$  [grad]  $\theta_R = 40,86$  [grad]  $\theta_R = 0,713$  [rad]

**Parameter der Verbindungsausführung:**

 Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 5,8$   $f_{u,k} = 500$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]*

 Durchmesser Gewindestange:  $d = 18$  [mm]

 Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 6$ 

 Lochleibungsfestigkeit:  $f_{h,0,k} = 25,55$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (202;204)]*

 Lochleibungsfestigkeit unter  $\gamma$ :  $f_{h,\gamma,k} = 19,99$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (203)]*

 Fließmoment der Gewindestange:  $M_{y,k} = 275296$  [Nmm] *[DIN 1052:2004-08, (208)]*
**Bemessungsfestigkeiten der Verbindung mit einer Gewindestange:**

(G.1)	$R_d = 40735$ [N]	<i>[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.2]</i>
(G.2)	$R_d = 40735$ [N]	
(G.3)	$R_d = 16873$ [N]	
(G.4)	$R_d = 15947$ [N]	
(G.5)	$R_d = 15947$ [N]	
(G.6)	$R_d = 11516$ [N]	

 minimale Verbindungsfestigkeit:  $\min R_d = 11516$  [N]

**gesamte Verbindungsfestigkeit:**
 **$F_{Rd} = 69,10$  [kN]**
 **$R = 66,51$  [kN]**

Tab. C.4: Verbindungsnachweis für Querkraft R im Randbereich A<sub>3</sub>

## Übertragung der Querkraftresultierenden R

Linienbezeichnung:	021	gelenkig	Bereich:	A3
--------------------	-----	----------	----------	----

 Querkraftkomponente:  $V = 37,38$  [kN]

 Schubkraftkomponente:  $N_{xy} = 40,28$  [kN]

 Rohdichte:  $\rho_k = 380$  [kg/m<sup>3</sup>]

### Zwischenergebnisse:

<b>Querkraftresultierende:</b>	<b>R = 54,95 [kN]</b>	
--------------------------------	-----------------------	--

 Winkel zur VB-Längsachse:  $\gamma = 42,86$  [grad]  $0,748$  [rad]

 $b = 0,416$   $c = 0,308$   $d = 0,280$ 

 Richtungsvektor der Resultierenden:  $R = \begin{pmatrix} -0,801 \\ 0,262 \\ 0,538 \end{pmatrix}$   $||R|| = 1$ 

 Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_R = 143,22$  [grad]  $\theta_R = 36,78$  [grad]  $\theta_R = 0,642$  [rad]

### Parameter der Verbindungsausführung:

 Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 5,8$   $f_{u,k} = 500$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]

 Durchmesser Gewindestange:  $d = 24$  [mm]

 Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 3$ 

 Lochleibungsfestigkeit:  $f_{h,0,k} = 23,68$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (202;204)]

 Lochleibungsfestigkeit unter  $\gamma$ :  $f_{h,\gamma,k} = 19,21$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (203)]

 Fließmoment der Gewindestange:  $M_{y,k} = 581622$  [Nmm] [DIN 1052:2004-08, (208)]

### Bemessungsfestigkeiten der Verbindung mit einer Gewindestange:

(G.1)	$R_d = 52186$ [N]	[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.2]
(G.2)	$R_d = 52186$ [N]	
(G.3)	$R_d = 21616$ [N]	
(G.4)	$R_d = 21424$ [N]	
(G.5)	$R_d = 21424$ [N]	
(G.6)	$R_d = 18946$ [N]	

 minimale Verbindungsfestigkeit:  $\min R_d = 18946$  [N]

### gesamte Verbindungsfestigkeit:

 **$F_{Rd} = 56,84$  [kN]**
 **$R = 54,95$  [kN]**

Tab. C.5: Verbindungsnachweis für Normalkraft  $N'$  im Randbereich  $A_1$ 

## Übertragung der Normalkraft $N$

Linienbezeichnung:	021	gelenkig	Bereich:	A1
--------------------	-----	----------	----------	----

Normalkraft  $N'$ :  $N' = -30,06$  [kN] Druck

Momentenkomponente:  $F_M = 0,00$  [kN]

<b>Summe der Normalkräfte:</b>	<b><math>N = -30,06</math> [kN]</b>	
--------------------------------	-------------------------------------	--

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_N = 57,83$  [grad] 1,009 [rad]

<b>Drucknachweis in unterster DS:</b>	<b><math>N = -30,06</math> [kN]</b>	
---------------------------------------	-------------------------------------	--

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_N = 57,83$  [grad] 1,009 [rad]

Bereichslänge:  $l_B = 0,60$  [m]

Höhe der Kontaktfläche:  $h_K = 63$  [mm]

Druckspannung:  $\sigma_D = -0,79$  [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit parallel zur Faser:  $f_{c,0,d} = 15,92$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, Tabelle F.5]*

Druckfestigkeit senkrecht zur Faser:  $f_{c,90,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Schub- und Torsionssteifigkeit:  $f_{v,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit unter Winkel  $\theta_N$ :  $f_{c,\theta,d} = 1,58$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (52)]*

**Nachweis:**

$\sigma_D / f_{c,\theta,d}$	0,50
-----------------------------	------

Tab. C.6: Verbindungsnachweis für Normalkraft  $N'$  im Mittelabschnitt  $A_2$ 

## Übertragung der Normalkraft $N$

Linienbezeichnung:	021	gelenkig	Bereich:	A2
--------------------	-----	----------	----------	----

Normalkraft  $N'$ :  $N' = -43,41$  [kN] Druck

Momentenkomponente:  $F_M = 0,00$  [kN]

<b>Summe der Normalkräfte:</b>	<b><math>N = -43,41</math> [kN]</b>	
--------------------------------	-------------------------------------	--

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_N = 57,83$  [grad] 1,009 [rad]

<b>Drucknachweis in unterster DS:</b>	<b><math>N = -43,41</math> [kN]</b>	
---------------------------------------	-------------------------------------	--

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_N = 57,83$  [grad] 1,009 [rad]

Bereichslänge:  $l_B = 2,70$  [m]

Höhe der Kontaktfläche:  $h_K = 63$  [mm]

Druckspannung:  $\sigma_D = -0,25$  [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit parallel zur Faser:  $f_{c,0,d} = 15,92$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, Tabelle F.5]*

Druckfestigkeit senkrecht zur Faser:  $f_{c,90,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Schub- und Torsionssteifigkeit:  $f_{v,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit unter Winkel  $\theta_N$ :  $f_{c,\theta,d} = 1,58$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (52)]*

**Nachweis:**

$\sigma_D / f_{c,\theta,d}$	0,16
-----------------------------	------

Tab. C.7: Verbindungsnachweis für Normalkraft  $N'$  im Randbereich  $A_3$ 

## Übertragung der Normalkraft $N$

Linienbezeichnung:	021	gelenkig	Bereich:	A3
--------------------	-----	----------	----------	----

Normalkraft  $N'$ :  $N' = 35,36$  [kN] Zug

Momentenkomponente:  $F_M = 0,00$  [kN]

<b>Summe der Normalkräfte:</b>	<b><math>N = 35,36</math> [kN]</b>	
--------------------------------	------------------------------------	--

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_N = 57,83$  [grad] 1,009 [rad]

<b>Erforderliche Gewindestange:</b>	<b><math>N = 35,36</math> [kN]</b>	
-------------------------------------	------------------------------------	--

Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 4,8$  [DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]

$f_{y,k} = 320$  [N/mm<sup>2</sup>]

$\gamma_M = 1,1$   $f_{y,d} = 291$  [N/mm<sup>2</sup>]

Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 1$   $A_{\text{erf}} = 122$  [mm<sup>2</sup>]

Durchmesser Gewindestange:  **$d = 12,44$  [mm]**  $A = 122$  [mm<sup>2</sup>]

<b>Krafteinleitung in äußere DS:</b>	<b><math>N = 35,36</math> [kN]</b>	
--------------------------------------	------------------------------------	--

Druckfestigkeit parallel zur Faser:  $f_{c,0,d} = 15,92$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, Tabelle F.5]

Druckfestigkeit senkrecht zur Faser:  $f_{c,90,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Schub- und Torsionssteifigkeit:  $f_{v,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit unter Winkel  $\theta_N$ :  $f_{c,\theta,d} = 1,58$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (52)]

### erforderliche Fläche der Unterlegscheibe:

Gewindestangendurchmesser:  $d = 24$  [mm]  $A = 452$  [mm<sup>2</sup>]

Anzahl der Gewindestangen:  $n = 2$

Breite der Unterlegscheibe:  $b = 450$  [mm]

Höhe der Unterlegscheibe:  $h = 55$  [mm]

effektive Fläche der Unterlegscheibe:  $A_s = 23845$  [mm]

Druckspannung:  $\sigma_D = 1,48$  [N/mm<sup>2</sup>]

### Nachweis:

**$\sigma_D / f_{c,\theta,d} = 0,94$**

## C.2 Verbindungslinie 021, steife Verbindung

### C.2.1 Schnittgrößen

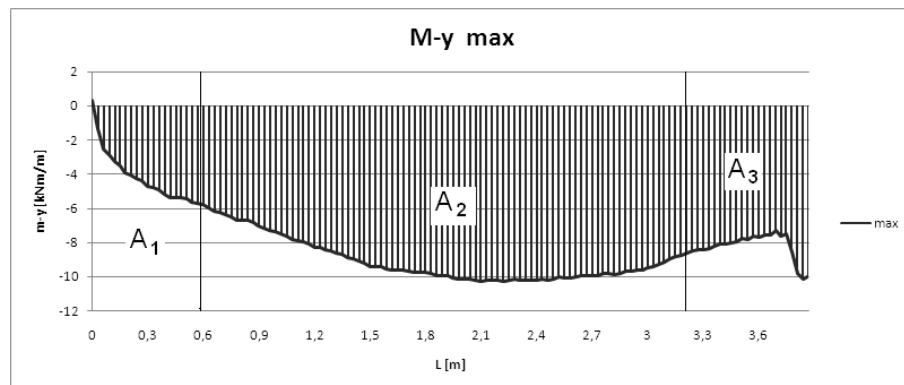


Abb. C.4: Momentenverlauf  $M-y$  in Liniengelenk 021 bei steifer Ausführung

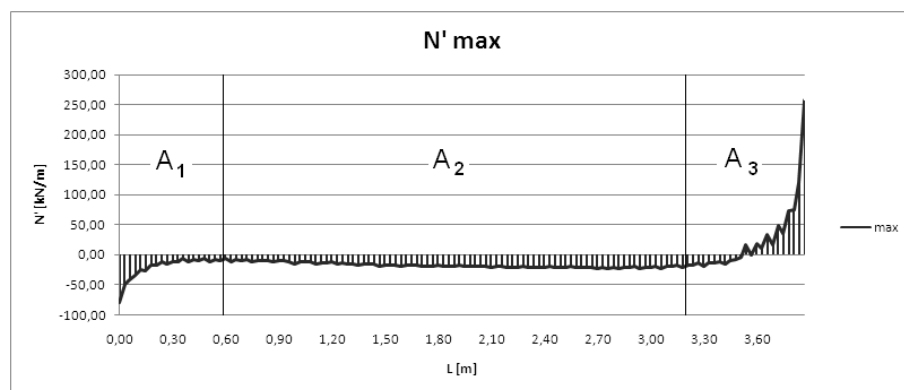


Abb. C.5: Verlauf  $N'$  in Liniengelenk 021 bei steifer Ausführung

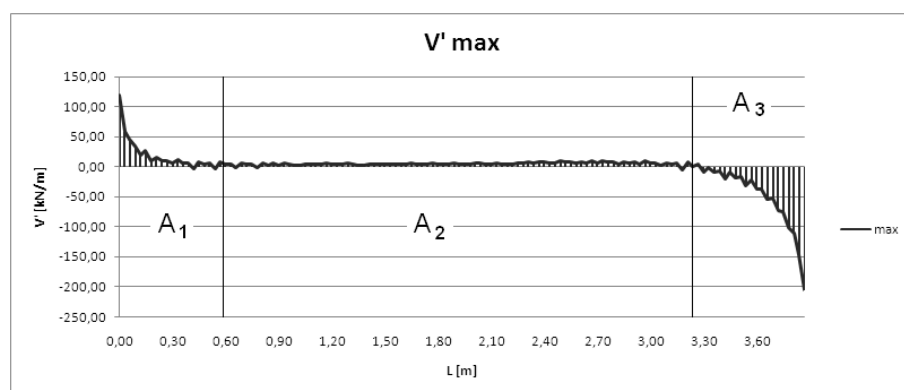


Abb. C.6: Verlauf  $V'$  in Liniengelenk 021 bei steifer Ausführung

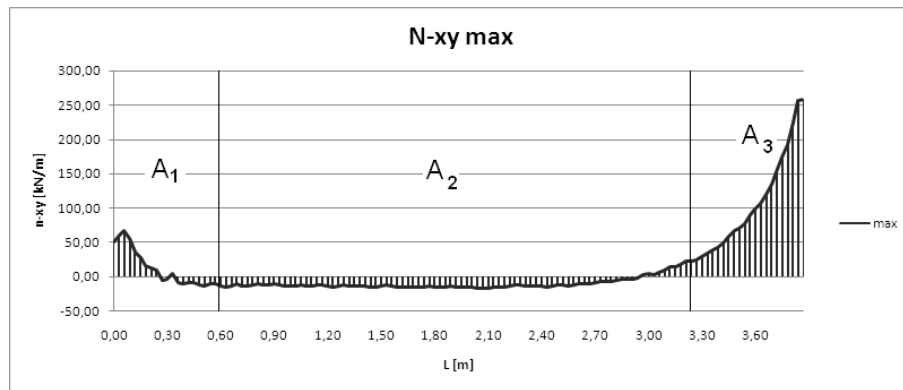


Abb. C.7: Verlauf  $N_{xy}$  in Liniengelenk 021 bei steifer Ausführung

## C.2.2 Nachweistabellen

Tab. C.8: Verbindungsnachweis für Querkraft R im Randbereich A<sub>1</sub>

### Übertragung der Querkraftresultierenden R

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A1
--------------------	-----	-------	----------	----

Querkraftkomponente:  $V = 12,19$  [kN]

Schubkraftkomponente:  $N_{xy} = 10,43$  [kN]

Rohdichte:  $\rho_k = 380$  [kg/m<sup>3</sup>]

**Zwischenergebnisse:**

<b>Querkraftresultierende:</b>	<b>R = 16,04 [kN]</b>	
--------------------------------	-----------------------	--

Winkel zur VB-Längsachse:  $\gamma = 49,45$  [grad]  $0,863$  [rad]

$b = 0,465$   $c = 0,344$   $d = 0,313$

Richtungsvektor der Resultierenden:  $R = \begin{pmatrix} -0,781 \\ 0,168 \\ 0,601 \end{pmatrix}$   $||R|| = 1$

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_R = 141,37$  [grad]  $\theta_R = 38,63$  [grad]  $0,674$  [rad]

**Parameter der Verbindungsausführung:**

Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 4,8$   $f_{u,k} = 400$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]*

Durchmesser Gewindestange:  $d = 18$  [mm]

Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 2$

Locheibungsfestigkeit:  $f_{h,0,k} = 25,55$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (202;204)]*

Locheibungsfestigkeit unter  $\gamma$ :  $f_{h,\gamma,k} = 20,39$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (203)]*

Fließmoment der Gewindestange:  $M_{y,k} = 220237$  [Nmm] *[DIN 1052:2004-08, (208)]*

**Bemessungsfestigkeiten der Verbindung mit einer Gewindestange:**

(G.1)	$R_d = 41544$ [N]	<i>[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.2]</i>
(G.2)	$R_d = 41544$ [N]	
(G.3)	$R_d = 17208$ [N]	
(G.4)	$R_d = 15996$ [N]	
(G.5)	$R_d = 15996$ [N]	
(G.6)	$R_d = 10402$ [N]	

minimale Verbindungsfestigkeit:  $\min R_d = 10402$  [N]

**gesamte Verbindungsfestigkeit:**

**$F_{Rd} = 20,80$  [kN]**

**$R = 16,04$  [kN]**



Tab. C.9: Verbindungsnachweis für Querkraft R im Mittelabschnitt A<sub>2</sub>

## Übertragung der Querkraftresultierenden R

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A2
--------------------	-----	-------	----------	----

Querkraftkomponente:	$V =$	12,73 [kN]
Schubkraftkomponente:	$N_{xy} =$	30,36 [kN]
Rohdichte:	$\rho_k =$	380 [kg/m <sup>3</sup> ]

### Zwischenergebnisse:

<b>Querkraftresultierende:</b>	<b>R =</b>	<b>32,92 [kN]</b>
--------------------------------	------------	-------------------

Winkel zur VB-Längsachse:	$\gamma =$	22,75 [grad]	0,397 [rad]
	$b =$	0,236	$c =$ 0,175 $d =$ 0,159
Richtungsvektor der Resultierenden:	$R =$	$\begin{vmatrix} -0,796 \\ 0,523 \\ 0,306 \end{vmatrix}$	$  R   =$ 1
Winkel zur Faserrichtung der DS:	$\theta_R =$	142,71 [grad]	$\theta_R =$ 37,29 [grad] $\theta_R =$ 0,651 [rad]

### Parameter der Verbindungsausführung:

Festigkeitsklasse:	$F_{kl}$	4,8	$f_{u,k} =$ 400 [N/mm <sup>2</sup> ]	[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]
Durchmesser Gewindestange:	$d =$	14 [mm]		
Anzahl Verbindungsmittel:	$n =$	6		
Locheibungsfestigkeit:	$f_{h,0,k} =$	26,80 [N/mm <sup>2</sup> ]		[DIN 1052:2004-08, (202;204)]
Locheibungsfestigkeit unter $\gamma$ :	$f_{h,\gamma,k} =$	21,64 [N/mm <sup>2</sup> ]		[DIN 1052:2004-08, (203)]
Fließmoment der Gewindestange:	$M_{y,k} =$	114581 [Nmm]		[DIN 1052:2004-08, (208)]

### Bemessungsfestigkeiten der Verbindung mit einer Gewindestange:

(G.1)	$R_d =$	34291 [N]	[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.2]
(G.2)	$R_d =$	34291 [N]	
(G.3)	$R_d =$	14204 [N]	
(G.4)	$R_d =$	12903 [N]	
(G.5)	$R_d =$	12903 [N]	
(G.6)	$R_d =$	6817 [N]	
minimale Verbindungsfestigkeit:	$\min R_d =$	6817 [N]	

### gesamte Verbindungsfestigkeit:

<b><math>F_{Rd} =</math></b>	<b>40,90 [kN]</b>
------------------------------	-------------------

<b><math>R =</math></b>	<b>32,92 [kN]</b>
-------------------------	-------------------

Tab. C.10: Verbindungsnachweis für Querkraft R im Randbereich A<sub>3</sub>

## Übertragung der Querkraftresultierenden R

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A3
--------------------	-----	-------	----------	----

 Querkraftkomponente:  $V = 31,57$  [kN]

 Schubkraftkomponente:  $N_{xy} = 68,79$  [kN]

 Rohdichte:  $\rho_k = 380$  [kg/m<sup>3</sup>]

**Zwischenergebnisse:**

<b>Querkraftresultierende:</b>	<b>R = 75,69 [kN]</b>	
--------------------------------	-----------------------	--

 Winkel zur VB-Längsachse:  $\gamma = 24,65$  [grad]  $0,430$  [rad]

 $b = 0,255$   $c = 0,189$   $d = 0,172$ 

 Richtungsvektor der Resultierenden:  $R = \begin{pmatrix} -0,800 \\ 0,501 \\ 0,330 \end{pmatrix}$   $||R|| = 1$ 

 Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_R = 143,16$  [grad]  $\theta_R = 36,84$  [grad]  $\theta_R = 0,643$  [rad]

**Parameter der Verbindungsausführung:**

 Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 4,8$   $f_{u,k} = 400$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]*

 Durchmesser Gewindestange:  $d = 32$  [mm]

 Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 3$ 

 Lochleibungsfestigkeit:  $f_{h,0,k} = 21,19$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (202;204)]*

 Lochleibungsfestigkeit unter  $\gamma$ :  $f_{h,\gamma,k} = 17,18$  [N/mm<sup>2</sup>] *[DIN 1052:2004-08, (203)]*

 Fließmoment der Gewindestange:  $M_{y,k} = 983040$  [Nmm] *[DIN 1052:2004-08, (208)]*
**Bemessungsfestigkeiten der Verbindung mit einer Gewindestange:**

(G.1)	$R_d = 62222$ [N]	<i>[DIN 1052:2004-08, Tabelle G.2]</i>
(G.2)	$R_d = 62222$ [N]	
(G.3)	$R_d = 25773$ [N]	
(G.4)	$R_d = 26772$ [N]	
(G.5)	$R_d = 26772$ [N]	
(G.6)	$R_d = 26896$ [N]	

 minimale Verbindungsfestigkeit:  $\min R_d = 25773$  [N]

**gesamte Verbindungsfestigkeit:**
 **$F_{Rd} = 77,32$  [kN]**
 **$R = 75,69$  [kN]**

Tab. C.11: Nachweis Blechanschluss für das Liniengelenk  $M_y$  im Randbereich A<sub>1</sub>

## Blechanschluss - negatives Moment

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A1
--------------------	-----	-------	----------	----

Druckkraft im Blech:  $F_M = -16,71$  [kN]

Komponente parallel zum Blech:  $F_s = 13,22$  [kN]

Komponente senkrecht zum Blech:  $F_z = 10,22$  [kN]

<b>Nachweis auf Abscheren:</b>	$F_s = 13,22$ [kN]	
--------------------------------	--------------------	--

Gewindedurchmesser:  $d = 7$  [mm]  $l_{ef} = 80$  [mm]  $= t$ 

Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 4.8$   $f_{u,k} = 400$  [N/mm<sup>2</sup>]

Lochleibungsfestigkeit:  $f_{b,k} = 17,38$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (212)]

Fließmoment:  $M_{y,k} = 18899$  [Nmm] [DIN 1052:2004-08, (214)]

### Bemessungsfestigkeiten für eine Schraube:

(G.1)  $R_d = 2791$  [N] [DIN 1052:2004-08, Tabelle G.4]

(G.2)  $R_d = 1950$  [N]

minimale Verbindungsfestigkeit:  $\min R_d = 1950$  [N]

### erforderliche Schraubenanzahl:

 $n_{erf} = 7$ 
 $R_{ra,d} = 13,65$  [kN]

<b>Nachweis auf Herausziehen:</b>	$F_z = 10,22$ [kN]	
-----------------------------------	--------------------	--

Tragfähigkeitsklasse Herausziehen:  $3$  [DIN 1052:2004-08, Tabelle 15]  
 $f_{1,k} = 11,552$  [N/mm<sup>2</sup>]

### Auszieh Widerstand:

(1)  $R_{ax,d} = 4658$  [N] [DIN 1052:2004-08, (235)]

### erforderliche Schraubenanzahl:

 $n_{erf} = 5$ 
 $R_{ax,d} = 23,29$  [kN]

### Kombinierter Nachweis der ersten Schraubenreihe:

gewählte Schraubenanzahl erste Reihe:  $n_1 = 6$ 

Gesamtschraubenanzahl:  $n = 10$ 
 $0,99$

Tab. C.12: Biege- und Knicknachweis im Profilblech für  $M_y$  im Randbereich A<sub>1</sub>

### Biege- u. Knicknachweise - negatives Moment

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A1
--------------------	-----	-------	----------	----

<b>Biegenachweis:</b>	$F_z =$	<b>10,22 [kN]</b>	
-----------------------	---------	-------------------	--

 $I_{ef} =$   [mm]

 minimale Knicklänge:  $l_k =$  66 [mm]

 Abstand erste Schraubenreihe:  $l_k =$   [mm]

 Stahlgüte:   $f_{y,k} =$  355 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $f_{y,d} =$  323 [N/mm<sup>2</sup>]

 Biegemoment:  $M_t =$  715331 [Nmm]

**erforderliche Plattendicke:**

$t_{min} =$ <b>6,18 [mm]</b>
------------------------------

<b>Biegeknicknachweis:</b>	$F_z =$	<b>10,22 [kN]</b>	$F_s =$	<b>13,22 [kN]</b>
----------------------------	---------	-------------------	---------	-------------------

 $E =$  200000 [N/mm<sup>2</sup>]

 $t =$   [mm]

 $\lambda_k =$  74,61

 $\lambda_a =$  74,57

 $\lambda_{\bar{k}} =$  1,001

Knickspannungslinie c:

 $\kappa =$  0,373

 $\alpha =$  0,49

 $\beta_m =$  0,44

 $k =$  1,19673028

 $N_{pl,d} =$  1258636 N

 $M_{pl,d} =$  1363523 Nmm

 $\Delta n =$  0,1

**erforderliche Plattendicke:**

<b>0,36</b>
-------------

Tab. C.13: Verbindungsnachweis für Normalkraft N im Randbereich A<sub>1</sub>

## Übertragung der Normalkraft N

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A1
--------------------	-----	-------	----------	----

Normalkraft N':  $N' = -12,94$  [kN] Zug

Momentenkomponente:  $F_M = 16,71$  [kN]

<b>Summe der Normalkräfte:</b>	<b>N = 3,77 [kN]</b>	
--------------------------------	----------------------	--

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_N = 57,83$  [grad] 1,009 [rad]

<b>Erforderliche Gewindestange:</b>	<b>N = 3,77 [kN]</b>	
-------------------------------------	----------------------	--

Festigkeitsklasse: Fkl 4.8 [DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]

$f_{y,k} = 320$  [N/mm<sup>2</sup>]

$\gamma_M = 1,1$   $f_{y,d} = 291$  [N/mm<sup>2</sup>]

Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 1$   $A_{\text{erf}} = 13$  [mm<sup>2</sup>]

Durchmesser Gewindestange: **d = 4,06 [mm]**  $A = 13$  [mm<sup>2</sup>]

<b>Krafteinleitung in äußere DS:</b>	<b>N = 3,77 [kN]</b>	
--------------------------------------	----------------------	--

Druckfestigkeit parallel zur Faser:  $f_{c,0,d} = 15,92$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, Tabelle F.5]

Druckfestigkeit senkrecht zur Faser:  $f_{c,90,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Schub- und Torsionssteifigkeit:  $f_{v,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit unter Winkel  $\theta_N$ :  $f_{c,\theta,d} = 1,58$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (52)]

### erforderliche Fläche der Unterlegscheibe:

Gewindestangendurchmesser:  $d = 18$  [mm]  $A = 254$  [mm<sup>2</sup>]

Anzahl der Gewindestangen:  $n = 2$

Breite der Unterlegscheibe:  $b = 60$  [mm]

Höhe der Unterlegscheibe:  $h = 55$  [mm]

effektive Fläche der Unterlegscheibe:  $A_s = 2791$  [mm]

Druckspannung:  $\sigma_D = 1,35$  [N/mm<sup>2</sup>]

### Nachweis:

$\sigma_D / f_{c,\theta,d}$  **0,85**

Tab. C.14: Nachweis Blechanschluss für das Liniengelenk  $M_y$  im Randbereich A<sub>3</sub>

## Blechanschluss - negatives Moment und Zugkraft

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A3
--------------------	-----	-------	----------	----

Druckkraft im Blech:  $F_M = -32,79 + 10,45 = -22,34$  [kN]

Komponente parallel zum Blech:  $F_s = 17,67$  [kN]

Komponente senkrecht zum Blech:  $F_z = 13,66$  [kN]

<b>Nachweis auf Abscheren:</b>	$F_s = 17,67$ [kN]
--------------------------------	--------------------

Gewindedurchmesser:  $d = 8$  [mm]  $l_{ef} = 75$  [mm]  $= t$

Festigkeitsklasse: Fkl: 4.8  $f_{u,k} = 400$  [N/mm<sup>2</sup>]

Lochleibungsfestigkeit:  $f_{h,k} = 16,70$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (212)]

Fließmoment:  $M_{y,k} = 26743$  [Nmm] [DIN 1052:2004-08, (214)]

### Bemessungsfestigkeiten für eine Schraube:

(G.1)  $R_d = 2873$  [N] [DIN 1052:2004-08, Tabelle G.4]

(G.2)  $R_d = 2430$  [N]

minimale Verbindungsfestigkeit:  $\min R_d = 2430$  [N]

### erforderliche Schraubenanzahl:

$n_{erf} = 8$

$R_{ra,d} = 19,44$  [kN]

<b>Nachweis auf Herausziehen:</b>	$F_z = 13,66$ [kN]
-----------------------------------	--------------------

Tragfähigkeitsklasse Herausziehen: 3 [DIN 1052:2004-08, Tabelle 15]

$f_{1,k} = 11,552$  [N/mm<sup>2</sup>]

### Ausziehungswiderstand:

(1)  $R_{ax,d} = 4990$  [N] [DIN 1052:2004-08, (235)]

### erforderliche Schraubenanzahl:

$n_{erf} = 6$

$R_{ax,d} = 29,94$  [kN]

<b>Kombinierter Nachweis der ersten Schraubenreihe:</b>
---

gewählte Schraubenzahl erste Reihe:  $n_1 = 7$

Gesamtschraubenzahl:  $n = 12$

**0,98**

Tab. C.15: Biege- und Knicknachweis im Profilblech für  $M_y$  im Randbereich A<sub>3</sub>

### Biege- u. Knicknachweise - negatives Moment

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A3
--------------------	-----	-------	----------	----

<b>Biegenachweis:</b>	$F_z =$	<b>13,66 [kN]</b>	
-----------------------	---------	-------------------	--

 $I_{ef} =$   [mm]

 minimale Knicklänge:  $I_k =$  66 [mm]

 Abstand erste Schraubenreihe:  $I_k =$   [mm]

 Stahlgüte:   $f_{y,k} =$  355 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $f_{y,d} =$  323 [N/mm<sup>2</sup>]

 Biegemoment:  $M_t =$  956233 [Nmm]

**erforderliche Plattendicke:**

$t_{min} =$ <b>7,15 [mm]</b>
------------------------------

<b>Biegeknicknachweis:</b>	$F_z =$	<b>13,66 [kN]</b>	$F_s =$	<b>17,67 [kN]</b>
----------------------------	---------	-------------------	---------	-------------------

 $E =$  200000 [N/mm<sup>2</sup>]

 $t =$   [mm]

 $\lambda_k =$  64,66

 $\lambda_a =$  74,57

 $\underline{\lambda}_k =$  0,867

Knickspannungslinie c:

 $\kappa =$  0,421

 $\alpha =$  0,49

 $\beta_m =$  0,44

 $k =$  1,03945401

 $N_{pl,d} =$  1452273 N

 $M_{pl,d} =$  1815341 Nmm

 $\Delta n =$  0,1

**Biegeknicknachweis:**

<b>0,36</b>
-------------

Tab. C.16: Verbindungsnachweis für Normalkraft N im Randbereich A<sub>3</sub>

## Übertragung der Normalkraft N

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A3
--------------------	-----	-------	----------	----

Normalkraft N':  $N' = 10,45$  [kN] Zug

Momentenkomponente:  $F_M = 32,79$  [kN]

<b>Summe der Normalkräfte:</b>	<b>N = 43,24 [kN]</b>	
--------------------------------	-----------------------	--

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_N = 57,83$  [grad] 1,009 [rad]

<b>Erforderliche Gewindestange:</b>	<b>N = 43,24 [kN]</b>	
-------------------------------------	-----------------------	--

Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 4,8$  [DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]  
 $f_{y,k} = 320$  [N/mm<sup>2</sup>]

$\gamma_M = 1,1$   $f_{y,d} = 291$  [N/mm<sup>2</sup>]

Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 1$   $A_{\text{erf}} = 149$  [mm<sup>2</sup>]

Durchmesser Gewindestange:  **$d = 13,76$  [mm]**  $A = 149$  [mm<sup>2</sup>]

<b>Krafteinleitung in äußere DS:</b>	<b>N = 43,24 [kN]</b>	
--------------------------------------	-----------------------	--

Druckfestigkeit parallel zur Faser:  $f_{c,0,d} = 15,92$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, Tabelle F.5]

Druckfestigkeit senkrecht zur Faser:  $f_{c,90,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Schub- und Torsionssteifigkeit:  $f_{v,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit unter Winkel  $\theta_N$ :  $f_{c,\theta,d} = 1,58$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (52)]

### erforderliche Fläche der Unterlegscheibe:

Gewindestangendurchmesser:  $d = 32$  [mm]  $A = 804$  [mm<sup>2</sup>]

Anzahl der Gewindestangen:  $n = 3$

Breite der Unterlegscheibe:  $b = 500$  [mm]

Höhe der Unterlegscheibe:  $h = 60$  [mm]

effektive Fläche der Unterlegscheibe:  $A_s = 27587$  [mm]

Druckspannung:  $\sigma_D = 1,57$  [N/mm<sup>2</sup>]

### Nachweis:

**$\sigma_D / f_{c,\theta,d} = 0,99$**



Tab. C.17: Nachweis Blechanschluss für das Liniengelenk  $M_y$  im Mittelbereich A<sub>2</sub>

## Blechanschluss - negatives Moment und Zugkraft

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A3
--------------------	-----	-------	----------	----

Druckkraft im Blech:  $F_M = -32,79 + 10,45 = -22,34$  [kN]

Komponente parallel zum Blech:  $F_s = 17,67$  [kN]

Komponente senkrecht zum Blech:  $F_z = 13,66$  [kN]

### Nachweis auf Abscheren:

Gewindedurchmesser:  $d = 8$  [mm]  $l_{ef} = 75$  [mm]  $= t$

Festigkeitsklasse: Fkl: 4.8  $f_{u,k} = 400$  [N/mm<sup>2</sup>]

Lochleibungsfestigkeit:  $f_{h,k} = 16,70$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (212)]

Fließmoment:  $M_{y,k} = 26743$  [Nmm] [DIN 1052:2004-08, (214)]

### Bemessungsfestigkeiten für eine Schraube:

(G.1)  $R_d = 2873$  [N] [DIN 1052:2004-08, Tabelle G.4]

(G.2)  $R_d = 2430$  [N]

minimale Verbindungsfestigkeit:  $\min R_d = 2430$  [N]

### erforderliche Schraubenanzahl:

$n_{erf} = 8$

$R_{ra,d} = 19,44$  [kN]

### Nachweis auf Herausziehen:

Tragfähigkeitsklasse Herausziehen: 3 [DIN 1052:2004-08, Tabelle 15]

$f_{t,k} = 11,552$  [N/mm<sup>2</sup>]

### Auszieh Widerstand:

(1)  $R_{ax,d} = 4990$  [N] [DIN 1052:2004-08, (235)]

### erforderliche Schraubenanzahl:

$n_{erf} = 6$

$R_{ax,d} = 29,94$  [kN]

### Kombinierter Nachweis der ersten Schraubenreihe:

gewählte Schraubenzahl erste Reihe:  $n_1 = 7$

Gesamtschraubenzahl:  $n = 12$

**0,98**

Tab. C.18: Biege- und Knicknachweis im Profilblech für  $M_y$  im Mittelbereich  $A_2$ 

### Biege- u. Knicknachweise - negatives Moment

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A3
--------------------	-----	-------	----------	----

<b>Biegenachweis:</b>	$F_z =$	<b>13,66 [kN]</b>	
-----------------------	---------	-------------------	--

$I_{ef} =$   [mm]

minimale Knicklänge:  $I_k =$  66 [mm]

Abstand erste Schraubenreihe:  $I_k =$   [mm]

Stahlgüte:   $f_{y,k} =$  355 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $f_{y,d} =$  323 [N/mm<sup>2</sup>]

Biegemoment:  $M_t =$  956233 [Nmm]

**erforderliche Plattendicke:**

**$t_{min} =$  7,15 [mm]**

<b>Biegeknicknachweis:</b>	$F_z =$	<b>13,66 [kN]</b>	$F_s =$	<b>17,67 [kN]</b>
----------------------------	---------	-------------------	---------	-------------------

$E =$  200000 [N/mm<sup>2</sup>]

$t =$   [mm]

$\lambda_k =$  64,66

$\lambda_a =$  74,57

$\underline{\lambda} =$  0,867

Knickspannungslinie c:

$\kappa =$  0,421

$\alpha =$  0,49

$\beta_m =$  0,44

$k =$  1,03945401

$N_{pl,d} =$  1452273 N

$M_{pl,d} =$  1815341 Nmm

$\Delta n =$  0,1

**Biegeknicknachweis:**

**0,36**

Tab. C.19: Verbindungsnachweis für Normalkraft N im Randbereich A<sub>2</sub>

## Übertragung der Normalkraft N

Linienbezeichnung:	021	steif	Bereich:	A3
--------------------	-----	-------	----------	----

Normalkraft N':  $N' = 10,45$  [kN] Zug

Momentenkomponente:  $F_M = 32,79$  [kN]

<b>Summe der Normalkräfte:</b>	<b>N = 43,24 [kN]</b>	
--------------------------------	-----------------------	--

Winkel zur Faserrichtung der DS:  $\theta_N = 57,83$  [grad] 1,009 [rad]

<b>Erforderliche Gewindestange:</b>	<b>N = 43,24 [kN]</b>	
-------------------------------------	-----------------------	--

Festigkeitsklasse:  $F_{kl} = 4,8$  [DIN 1052:2004-08, Tabelle G.12]

$f_{y,k} = 320$  [N/mm<sup>2</sup>]

$\gamma_M = 1,1$   $f_{y,d} = 291$  [N/mm<sup>2</sup>]

Anzahl Verbindungsmittel:  $n = 1$   $A_{\text{erf}} = 149$  [mm<sup>2</sup>]

Durchmesser Gewindestange:  **$d = 13,76$  [mm]**  $A = 149$  [mm<sup>2</sup>]

<b>Krafteinleitung in äußere DS:</b>	<b>N = 43,24 [kN]</b>	
--------------------------------------	-----------------------	--

Druckfestigkeit parallel zur Faser:  $f_{c,0,d} = 15,92$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, Tabelle F.5]

Druckfestigkeit senkrecht zur Faser:  $f_{c,90,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Schub- und Torsionssteifigkeit:  $f_{v,d} = 1,87$  [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit unter Winkel  $\theta_N$ :  $f_{c,\theta,d} = 1,58$  [N/mm<sup>2</sup>] [DIN 1052:2004-08, (52)]

### erforderliche Fläche der Unterlegscheibe:

Gewindestangendurchmesser:  $d = 32$  [mm]  $A = 804$  [mm<sup>2</sup>]

Anzahl der Gewindestangen:  $n = 3$

Breite der Unterlegscheibe:  $b = 500$  [mm]

Höhe der Unterlegscheibe:  $h = 60$  [mm]

effektive Fläche der Unterlegscheibe:  $A_s = 27587$  [mm]

Druckspannung:  $\sigma_D = 1,57$  [N/mm<sup>2</sup>]

### Nachweis:

**$\sigma_D / f_{c,\theta,d} = 0,99$**

## C.3 Vergleichsdiagramme zwischen Verbindung 021 und 933

### C.3.1 gelenkige Ausführung

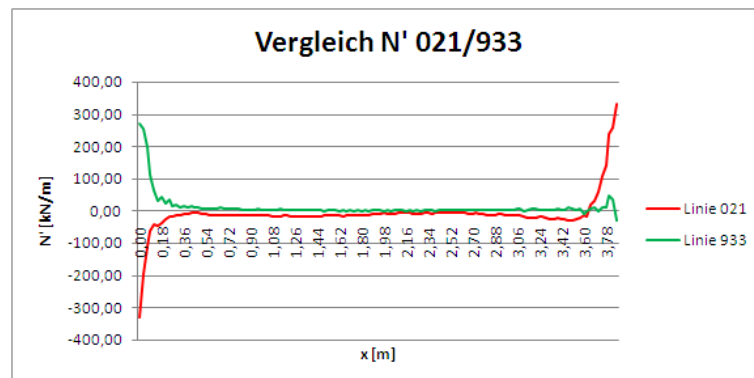


Abb. C.8: Vergleich der Normalkraft  $N'$  der Linienverbindungen 021 und 933 bei gelenkigen Anschlüssen

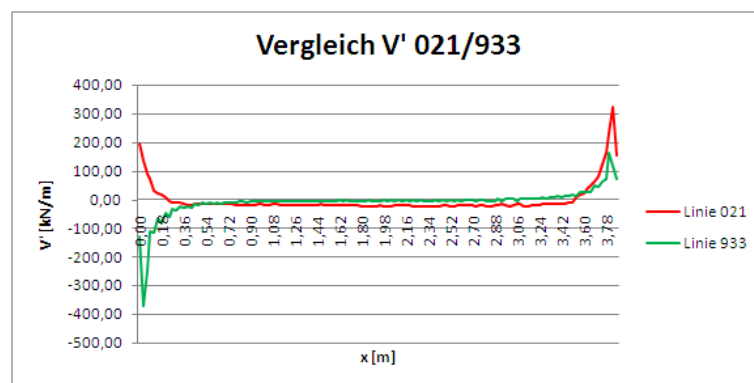


Abb. C.9: Vergleich der Querkraft  $V'$  der Linienverbindungen 021 und 933 bei gelenkigen Anschlüssen

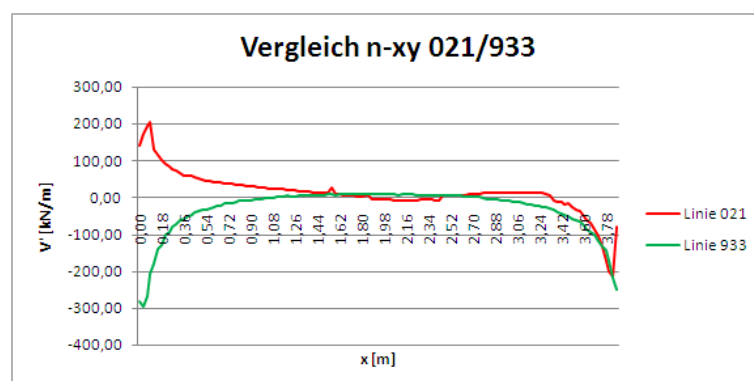


Abb. C.10: Vergleich der Schubkraft  $n_{xy}$  der Linienverbindungen 021 und 933 bei gelenkigen Anschlüssen

### C.3.2 steife Ausführung

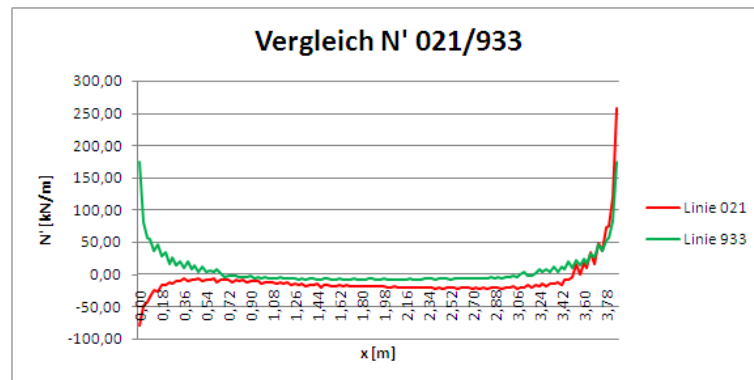


Abb. C.11: Vergleich der Normalkraft  $N'$  der Linienverbindungen 021 und 933 bei steifen Anschlüssen

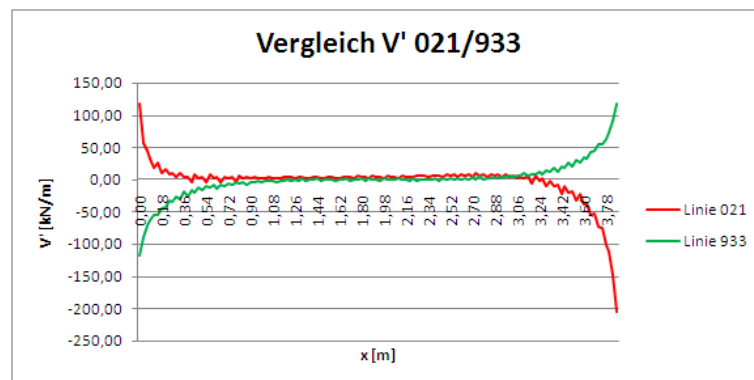


Abb. C.12: Vergleich der Querkraft  $V'$  der Linienverbindungen 021 und 933 bei steifen Anschlüssen

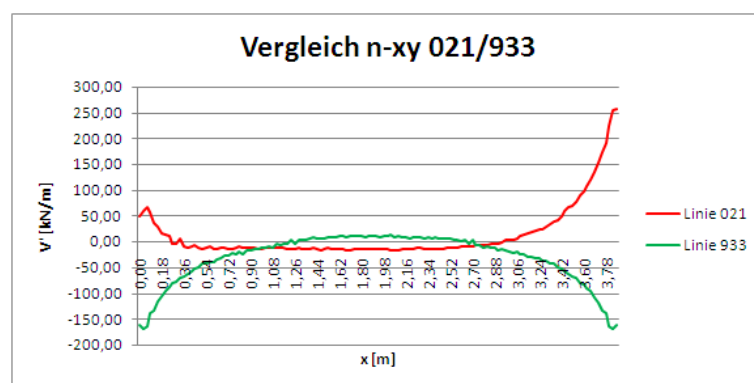


Abb. C.13: Vergleich der Schubkraft  $n_{xy}$  der Linienverbindungen 021 und 933 bei steifen Anschlüssen

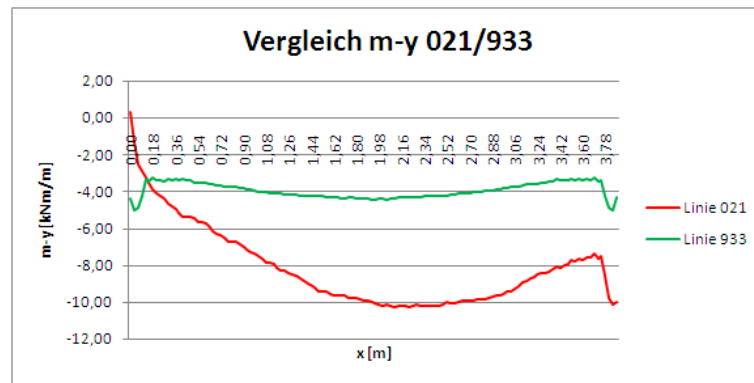


Abb. C.14: Vergleich des Liniengelenks  $m_y$  der Linienverbindungen 021 und 933 bei steifen Anschlüssen

# Literaturverzeichnis

- [1] BATTISTI, Valentin: *Faltwerke aus Brettsperrholz*, TU Graz, Diplomarbeit, 2009
- [2] <http://www.wikipedia.de>
- [3] <http://www.ki-smile.de>
- [4] LEITNER, Katharina: *Tragkonstruktionen aus plattenförmigen Holzwerkstoffen mit der Textilen Fuge*, Fakultät für Architektur RHTW Aachen, Diss., 2004
- [5] <http://www.origami-kunst.de>
- [6] BURI, Hani: Die Technik des Origami im Holzbau - Faltwerkkonstruktionen aus BSP-Elementen. In: *Tagungsband 5. Grazer Holzbau-Fachtagung*, 2006
- [7] <http://www.fischer-massivholzhaus.at>
- [8] <http://www.tu-dresden.de/biwibh/holzbau/forschung/>
- [9] SCHICKHOFER, Gerhard ; MOOSBRUGGER, Thomas ; JÖBSTL, Robert ; HASEWEND, Björn ; TRAETTA, Gianluigi: Entwicklung des Brettsperrholzes - Ein Blick auf Forschung und Entwicklung für eine Produkt mit Zukunftspotential. In: *Tagungsband 5. Grazer Holzbau-Fachtagung*, TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2006
- [10] NATTERER, Johannes ; PIRAZZI, Claudio ; WEINAND, Prof. Y.: Analyse comparative d'une structure Origami / IBOIS, Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit ENAC, EPFL Lausanne. 2006. – Forschungsbericht
- [11] WEINAND, Yves ; PIRAZZI, Claudio: Structures spatiales en bois : analyse structurelle d'une coque plissée en bois avec le logiciel de calcul SAP2000 NL V9.16 / IBOIS, Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit ENAC, EPFL Lausanne. 2006. – Forschungsbericht
- [12] JÖBSTL, Robert A. ; SCHICKHÖFER, Gerhard: Traglastnachweis für Brettsperrholzplatten. In: *Praktische Anwendung von Massivholzplatten, Tagungsband 39. Fortbildungskurs 2007 der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH*, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH, 2007
- [13] *Schneider Bautabellen für Ingenieure*. 2006
- [14] *SIA 261 Einwirkungen auf Tragwerke 2003. : SIA 261 Einwirkungen auf Tragwerke 2003*
- [15] *RFEM 3 - Räumliche Tragwerke nach der Finiten Elementen Methode Programmbeschreibung. : RFEM 3 - Räumliche Tragwerke nach der Finiten Elementen Methode Programmbeschreibung*

- 
- [16] DIN 1052:2004-08 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. : DIN 1052:2004-08 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [17] JÖBSTL, Robert ; MOOSBRUGGER, Thomas ; BOGENSPERGER, Thomas ; SCHICKHOFER, Gerhard: Forschung an der TU Graz - Neue Erkenntnisse zur Nachweisführung von Biegebeanspruchten BSP-Elementen. In: *Tagungsband 5. Grazer Holzbau-Fachtagung*, TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2006
- [18] BURI, Hani ; WEINAND, Yves: Übersicht Massivholzplatten. In: *Praktische Anwendung von Massivholzplatten, Tagungsband 39. Fortbildungskurs 2007 der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH*, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH, 2007
- [19] PIMBACHER, Gernod ; TRAETTA, Gianluigi ; SCHICKHOFER, Gerhard: Anwendung der Johanssen-Theorie für gekreuzt geschichtete Strukturen. In: *Tagungsband 5. Grazer Holzbau-Fachtagung*, 2006
- [20] PIMBACHER, Gernot ; TRAETTA, Gianluigi ; SCHICKHOFER, Gerhard: Forschung an der Universität Karlsruhe - Stiffförmige Verbindungsmittel in Brettsperrholz. In: *Tagungsband 5. Grazer Holzbau-Fachtagung*, 2006



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Veranschaulichung der Steifigkeitsgewinnung durch Faltung an einem Stück Papier [1] . . . . .	4
2.2	Beispiele natürlicher Faltwerke: Insektenflügel (links) und Buchenblatt (rechts) [1]	5
2.3	Gefaltete Spundwände [2] und Trapezprofile unter Fahrbahnplatte [3] . . . . .	5
2.4	Fünf Grundfaltmuster nach K. LEITNER [4] . . . . .	6
2.5	Variation durch Gegenfaltung (oben) und Variation durch Gegenläufige Faltung (unten) [4] . . . . .	7
2.6	Origami-Kranich [5] und modulares Origami [?] . . . . .	7
2.7	Darstellung einer Umkehrfalte . . . . .	8
2.8	Unregelmäßige Rautenfaltung [6] . . . . .	9
2.9	Verformbares Modell mit Fischgrätenfaltung [6] . . . . .	9
2.10	Schraubenförmige Diagonalfaltung . . . . .	10
2.11	Aufbau einer Brettsperrholzplatte [1] . . . . .	11
2.12	Vorgefertigte Massivholzplatte [7] und Innenansicht des Atelierhauses Hellerau [8]	12
2.13	Basiselement für den Prototyp [10] und Grundbaustein aus zwei Basiselementen [11]	14
2.14	Prototyp mit Versuchsanordnung [IBOIS] . . . . .	14
2.15	Lastfälle und Verformungsmesspunkte am Prototyp [10] . . . . .	15
2.16	Probeaufbau zur Ermittlung der Drehsteifigkeit der Verbindung [10] . . . . .	16
2.17	Messpunkte für vertikale Verschiebungen[10] . . . . .	16
2.18	Aufreißen der Verbindungen beim Versagen des Faltwerks [6] . . . . .	17
3.1	Räumliche Darstellung des Faltwerks aus Massivholzplatten . . . . .	18
3.2	Dachform und Dachformbeiwerte zur Ermittlung der Schneelast [14] . . . . .	20
4.1	Eingabefenster für Flächenlasten [15] . . . . .	23
4.2	Definition der Schnittgrößen . . . . .	24
4.3	Ausrichtung der lokalen Achsensysteme ohne Vorgabe (links) und nach Neufestlegung (rechts) . . . . .	25
4.4	Ursprüngliche Ausrichtung der lokalen Koordinatensysteme (links) und Neuorientierung entlang der Verbindung (rechts) . . . . .	26
4.5	Verkleinerte Struktur für Voruntersuchungen bestehend aus zwei Einzelbögen . .	27
4.6	Eingabefenster für die Festlegung von Liniengelenken [15] . . . . .	27
4.7	Eingabefenster für FE-Netzverdichtung an den Knoten [15] . . . . .	29
4.8	FE-Netzverdichtung kreisförmig (links) und auf rechteckigen Bereich (rechts) . .	30
4.9	Verlauf der Verformungen mit zunehmender Dichte bei kreisförmiger Verdichtung an den Knoten und gelenkigen Verbindungen . . . . .	30

4.10	Verformungen bei 0,03 m Innenabmessungen und Verkleinerung der Elementgröße außen für gelenkige Verbindungen . . . . .	31
4.11	Verlauf der Verformungen mit zunehmender Dichte bei kreisförmiger Verdichtung an den Knoten und steifen Verbindungen . . . . .	32
4.12	Eingabefenster für FE-Netzverdichtung an den Linien . . . . .	32
4.13	FE-Netzverdichtung entlang der Linien mit 0,05 m FE-Länge . . . . .	33
4.14	Verlauf der Verformungen mit zunehmender Verdichtung entlang der Linien bei gelenkigen Verbindungen . . . . .	33
4.15	Verlauf der Verformungen mit zunehmender Verdichtung entlang der Linien bei steifen Verbindungen . . . . .	33
4.16	Verformungen bei 0,03 m Elementabmessungen entlang der Linien und Verkleinerung der allgemeinen Elementgröße . . . . .	34
4.17	Spannungskonzentrationen an einem Knotenpunkt im First ohne (links) und mit Spannungsöffnungen (rechts) . . . . .	35
4.18	Hauptspannungen ohne Spannungsöffnungen (links) und mit Spannungsöffnungen (rechts) . . . . .	36
4.19	Momente $m_y$ in Beispielverbindung bei unterschiedlichen Einstellungen . . . . .	37
5.1	Vergleich der Verformungen $u$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	39
5.2	Knotenkennzeichnung für die Verformungsauswertung . . . . .	40
5.3	Verschiebungen der Knoten im Bereich A . . . . .	41
5.4	Verschiebungen der Knoten im Bereich B . . . . .	41
5.5	Draufsicht mit Plattenbezeichnungen . . . . .	43
5.6	Vergleich der Hauptspannungen in den Plattenreihen . . . . .	45
6.1	Bezeichnung der Scheiben- und Plattenschnittgrößen an einem Plattenausschnitt [16] . . . . .	47
6.2	Festlegung der Integrationskonstante $z'$ . . . . .	51
6.3	Draufsicht mit Plattenbezeichnungen . . . . .	54
7.1	Räumliche Darstellung der betrachteten Schnittgrößen in den Liniengelenken . .	62
7.2	Ursprüngliche Ausrichtung der lokalen Koordinatensysteme (links) und Neuorientierung entlang der Verbindung (rechts) . . . . .	63
7.3	Darstellung der Schnittgrößenverläufe durch RFEM . . . . .	64
7.4	Schnitt in Richtung der Verbindungslängsachse . . . . .	65
7.5	Zusammenführung der beidseitigen Schnittkräfte . . . . .	65
7.6	Quer- und Normalkräfte vor (links) und nach der Umrechnung (rechts) . . . . .	66
7.7	Schnittkraftverlauf für $N'$ im Beispiel . . . . .	66
7.8	Schnitt durch einen gelenkigen Plattenanschluß . . . . .	67
7.9	Darstellung einer biegesteifen Plattenverbindung . . . . .	68
7.10	Ermittlung des Mindestabstands der ersten Verbindung . . . . .	70
7.11	Rotation der Hauptrichtungen um Winkel $\alpha$ und $\beta$ . . . . .	73
7.12	Ermittlung des Angriffswinkels der Querkraftresultierenden $R$ . . . . .	74
7.13	Kräftezerlegung bei Profilblechanschluß . . . . .	75

7.14	Aufteilung einer Zugkraft auf die beiden Stahlbauteile oben . . . . .	76
7.15	Linienbezeichnungen ausgewählter Bereiche . . . . .	82
7.16	Anordnung der Gewindestangen in Linienverbindung 021 bei gelenkiger Ausführung	86
7.17	Anordnung der Holzschrauben in Bereich $A_1$ . . . . .	88
7.18	Anordnung der Holzschrauben in Bereich $A_3$ . . . . .	90
7.19	Anordnung der Gewindestangen in Linienverbindung 021 bei steifer Ausführung	90
8.1	Vorschläge zur Aussteifung des instabilen Randbereichs . . . . .	94
8.2	Erhöhung der Steifigkeiten durch Variation der Faltungen . . . . .	94
A.1	Gegenüberstellung des Momentes $m$ - $x$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	99
A.2	Gegenüberstellung der Normalkraft $n$ - $x$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	100
A.3	Gegenüberstellung der Querkraft $v$ - $x$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	100
A.4	Gegenüberstellung des Moments $m$ - $y$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	101
A.5	Gegenüberstellung der Normalkraft $n$ - $y$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	101
A.6	Gegenüberstellung der Querkraft $v$ - $y$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	102
A.7	Gegenüberstellung des Schubmoments $m$ - $xy$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	102
A.8	Gegenüberstellung der Schubkraft $n$ - $xy$ bei gelenkigen (links) und steifen Verbindungen (rechts) . . . . .	103
C.1	Verlauf $N'$ in Liniengelenk 021 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	127
C.2	Verlauf $V'$ in Liniengelenk 021 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	127
C.3	Verlauf $N$ - $xy$ in Liniengelenk 021 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	127
C.4	Momentenverlauf $M$ - $y$ in Liniengelenk 021 bei steifer Ausführung . . . . .	134
C.5	Verlauf $N'$ in Liniengelenk 021 bei steifer Ausführung . . . . .	134
C.6	Verlauf $V'$ in Liniengelenk 021 bei steifer Ausführung . . . . .	134
C.7	Verlauf $N$ - $xy$ in Liniengelenk 021 bei steifer Ausführung . . . . .	135
C.8	Vergleich der Normalkraft $N'$ der Linienverbindungen 021 und 933 bei gelenkigen Anschlüssen . . . . .	148
C.9	Vergleich der Querkraft $V'$ der Linienverbindungen 021 und 933 bei gelenkigen Anschlüssen . . . . .	148
C.10	Vergleich der Schubkraft $n_{xy}$ der Linienverbindungen 021 und 933 bei gelenkigen Anschlüssen . . . . .	148
C.11	Vergleich der Normalkraft $N'$ der Linienverbindungen 021 und 933 bei steifen Anschlüssen . . . . .	149
C.12	Vergleich der Querkraft $V'$ der Linienverbindungen 021 und 933 bei steifen Anschlüssen . . . . .	149

C.13 Vergleich der Schubkraft $n_{xy}$ der Linienverbindungen 021 und 933 bei steifen Anschlüssen . . . . .	149
C.14 Vergleich des Liniengelenks $m_y$ der Linienverbindungen 021 und 933 bei steifen Anschlüssen . . . . .	150

# Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Verformungen bei drei verschiedenen FEM Programmen [10] . . . .	15
2.2	Vergleich der Verformungen zwischen den Messungen (Essai) und den Berechnungen mit RFEM . . . . .	17
3.1	charakteristische Flächenlasten des Dachaufbaus . . . . .	19
4.1	Zusammenfassung der Programmeinstellung zur Berechnung der Tennishalle . . .	38
5.1	Tabellarische Gegenüberstellung der Verformungen . . . . .	42
5.2	Vergleich der maximalen Grundschnittgrößen in den Flächen 7 und 27 . . . . .	43
5.3	Vergleich der maximalen Grundschnittgrößen in den Flächen 134 und 139 . . . .	44
6.1	Steifigkeitskennwerte für Nadelholz der Festigkeitsklassen C20 und C24 [N/mm <sup>2</sup> ] .	50
6.2	Platten- und Scheibensteifigkeiten der BSP-Platte . . . . .	52
6.3	Übersicht über maßgebende und ergänzende Schnittgrößen für die Nachweisführung.	53
6.4	Bemessungsfestigkeiten der verwendeten Festigkeitsklassen in N/mm <sup>2</sup> . . . . .	53
6.5	Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 007 . . . . .	57
6.6	Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in y-Richtung in Fläche 007 . . . . .	57
6.7	Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 027 . . . . .	59
6.8	Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 027 . . . . .	60
7.1	Geometrische Ausgangsgrößen der Verbindung Linie 021 . . . . .	82
7.2	Zusammenfassung der Schnittgrößen aus den Schnittgrößenverläufen im Anhang C.1.1 für gelenkige Anschlüsse . . . . .	83
7.3	Mindestabstände für Stabdübel in Brettsper Holz nach [20] . . . . .	85
7.4	Zusammenfassung der Schnittgrößen aus den Schnittgrößenverläufen für steife Anschlüsse . . . . .	86
8.1	Vergleich der Steifigkeiten unterschiedlicher Plattenaufbauten . . . . .	93
B.1	Plattensteifigkeiten für Biegung und Drillung . . . . .	105
B.2	Schubsteifigkeiten für Querkraftbeanspruchungen . . . . .	106
B.3	Scheibensteifigkeiten der gewählten BSP-Platte . . . . .	107
B.4	Ausgabe der Grundschnittgrößen durch RFEM in Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	108

B.5	Ausgabe der Grundschnittgrößen durch RFEM in Fläche 007 bei steifer Ausführung	109
B.6	Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 007 in x-Richtung . . . . .	110
B.7	Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 007 in y-Richtung . . . . .	111
B.8	Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 027 in x-Richtung . . . . .	112
B.9	Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 027 in y-Richtung . . . . .	113
B.10	Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 134 in x-Richtung . . . . .	114
B.11	Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 134 in y-Richtung . . . . .	115
B.12	Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 139 in x-Richtung . . . . .	116
B.13	Zusammenstellung der maßgebenden Grundschnittgrößen in der Fläche 139 in y-Richtung . . . . .	117
B.14	Nachweistabelle für m-x in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	118
B.15	Nachweistabelle für m-y in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	119
B.16	Nachweistabelle für n-x in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	119
B.17	Nachweistabelle für n-y in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	120
B.18	Nachweistabelle für v-x in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	120
B.19	Nachweistabelle für v-y in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung . . . . .	121
B.20	Nachweistabelle für m-xy in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung mit v-x . .	121
B.21	Nachweistabelle für m-xy in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung mit v-y . .	122
B.22	Nachweistabelle für n-xy in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung mit v-x . .	122
B.23	Nachweistabelle für n-xy in der Fläche 007 bei gelenkiger Ausführung mit v-y . .	123
B.24	Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 134 . . . . .	124
B.25	Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in y-Richtung in Fläche 134 . . . . .	124
B.26	Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in x-Richtung in Fläche 139 . . . . .	125
B.27	Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse für Beanspruchungen in y-Richtung in Fläche 139 . . . . .	125
C.1	Eingabeformular für die Ermittlung der geometrischen Grundgrößen für Linie 021	126
C.2	Verbindungsnachweis für Querkraft R im Randbereich A <sub>1</sub> . . . . .	128
C.3	Verbindungsnachweis für Querkraft R im Mittelabschnitt A <sub>2</sub> . . . . .	129
C.4	Verbindungsnachweis für Querkraft R im Randbereich A <sub>3</sub> . . . . .	130
C.5	Verbindungsnachweis für Normalkraft N' im Randbereich A <sub>1</sub> . . . . .	131
C.6	Verbindungsnachweis für Normalkraft N' im Mittelabschnitt A <sub>2</sub> . . . . .	132
C.7	Verbindungsnachweis für Normalkraft N' im Randbereich A <sub>3</sub> . . . . .	133
C.8	Verbindungsnachweis für Querkraft R im Randbereich A <sub>1</sub> . . . . .	136

C.9	Verbindungsnachweis für Querkraft $R$ im Mittelabschnitt $A_2$	137
C.10	Verbindungsnachweis für Querkraft $R$ im Randbereich $A_3$	138
C.11	Nachweis Blechanschluss für das Liniengelenk $M_y$ im Randbereich $A_1$	139
C.12	Biege- und Knicknachweis im Profilblech für $M_y$ im Randbereich $A_1$	140
C.13	Verbindungsnachweis für Normalkraft $N$ im Randbereich $A_1$	141
C.14	Nachweis Blechanschluss für das Liniengelenk $M_y$ im Randbereich $A_3$	142
C.15	Biege- und Knicknachweis im Profilblech für $M_y$ im Randbereich $A_3$	143
C.16	Verbindungsnachweis für Normalkraft $N$ im Randbereich $A_3$	144
C.17	Nachweis Blechanschluss für das Liniengelenk $M_y$ im Mittelbereich $A_2$	145
C.18	Biege- und Knicknachweis im Profilblech für $M_y$ im Mittelbereich $A_2$	146
C.19	Verbindungsnachweis für Normalkraft $N$ im Randbereich $A_2$	147